



TITLE:

リモートセンシングによる都市域
の地物判定に関する研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

星, 仰

CITATION:

星, 仰. リモートセンシングによる都市域の地物判定に関する研究. 京都大学, 1978, 工学博士

ISSUE DATE:

1978-07-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r3645>

RIGHT:

リモートセンシングによる都市域の
地物判定に関する研究

昭和53年2月

星

仰

リモートセンシングによる都市域の
地物判定に関する研究

昭和53年2月

星

仰

序

最近、米国・ソ連を中心としたリモートセンシング技術の開発により、いままで入手不可能であった地球周辺はもちろんのこと、惑星の情報までがわれわれに提供されるようになった。この技術を地球表面の諸現象・物体調査に応用するために、*NASA*などでは多大の努力がなされ、衛星・航空機・地上測定車などによる同時観測などもすでに実施されてきている。わが国は国土も狭く、資源も豊富とはいえず、土地や資源の有効な利用方法が必要とされており、土地利用調査、地図作成、農作物調査、漁業調査、気象調査および種々の環境調査などにリモートセンシング技術が役立つと考えられる。

このような観点からリモートセンシングによって地表状況の識別と判定を行なって、広域にわたる地物の分類を電子計算機を利用して実行する方法を研究する。このような判定法を用いて、地物を各種の目的に応じて分類を行い、地表上の現状を速かに知ることは土地利用計画、都市計画、地域計画などに必要な基礎資料として重要である。ところで、各種地物の混在する都市域が最も地物分類の困難かつ面倒な場所であるから、研究対象地域をこのような都市域とし、リモートセンシング資料としては、航空機によって得られたマルチスペクトラル・スキャナ(MSS)記録を用いることにする。

なお、現在までの研究は機器と一般的な分類手法の開発が主であったが、本研究ではMSS記録を用いて実際に地物判定をするときの問題点の指摘とその改善、結果の良否判定法と精度向上のための手法の開発を目指している。

この研究を遂行するに当たり、御指導と御鞭撻を賜った岡山大学教授 森忠次先生、本論文作成に際し御指導と御鞭撻を賜った京都大学教授 佐佐木綱先生 に対し深甚なる謝意を表する。

また、常時御激励をいただいた京都大学名誉教授 石原藤次郎先生、和歌山工業高等専門学校校長 近藤繁人先生 に対し厚く御礼申し上げる次第である。

目 次

第 1 章	緒 論	1
1.1	MSSによる地物判定の意義	1
1.2	研究の方針および本論文の概要	2
	参 考 文 献	3
第 2 章	リモートセンシングの概要とチャンネル演算	5
2.1	概 説	5
2.2	プラットフォームによる分類	7
2.2.1	人工衛星によるリモートセンシング	7
2.2.2	航空機によるリモートセンシング	8
2.3	センサーによる分類	9
2.4	地物の放射・反射エネルギー特性	13
2.4.1	MSS画像の基礎理論	13
2.4.2	チャンネル演算の一般式	18
2.5	結 語	19
	参 考 文 献	20
第 3 章	航空機によるMSSの幾何学的性質	23
3.1	概 説	23
3.2	MSSの機構	23
3.2.1	MSSの検出素子と応答曲線	23
3.2.2	MSSデータの情報の流れ	25
3.3	MSSの近似的偏位修正理論	26
3.4	MSSの偏位修正要素の挙動	32
3.5	考 察	34
3.5.1	偏位修正量とその適用への考察	34
3.5.2	走査方向Yへの考察	34
3.5.3	飛行方向Xへの考察	35
3.6	結 語	37
	参 考 文 献	38

第 4 章	カラー合成写真の地物判読法	40
4.1	従来の写真判読と処理の研究	40
4.1.1	写真判読の経過	40
4.1.2	カラー合成写真判読とその処理	41
4.2	カラー合成写真の作成法	43
4.2.1	FMテープによるMSS画像のカラー合成写真	44
4.2.2	CCTによるカラー合成写真	47
4.3	カラー合成写真による地物の分類法	50
4.3.1	MSS画像によるPMSS写真の地物分類法	51
4.3.2	CCTによるPCCT写真の地物分類法	55
4.4	あいまい度の尺度による分類結果の評価法	56
4.5	カラー合成写真判読法の適用結果とその考察	59
4.5.1	MSS画像によるPMSS写真の2次元的分類結果とその考察	59
4.5.2	PMSS, PCCT写真の3次元的空間分類の結果とその考察	64
4.6	結 語	66
	参 考 文 献	68
第 5 章	CCCTデータの処理システムと地物判定	70
5.1	概 説	70
5.2	USAS手法によるデータ処理システム	71
5.3	CCCTの作成とデータ点検	74
5.3.1	CCCTの作成手順	74
5.3.2	CCCTのデータ点検	75
5.4	トレーニング地区の選定用図面の作成	77
5.4.1	チャンネル別グレースマップ	77
5.4.2	パスラジアンズ除去のグレースマップ	78
5.4.3	チャンネル和によるグレースマップ	78
5.4.4	教師なし分類によるグレースマップ	78
5.4.5	トレーニング地区選定用図面の決定	88
5.5	トレーニング地区の選定と統計量	88
5.5.1	トレーニング地区の選定	88

5.5.2	分類項目検討用の図形処理	86
5.5.3	トレーニング地区の地表クラスの統計量	92
5.5.4	トレーニング地区の分類結果	94
5.6	地表クラス間のチャンネル選択法	94
5.7	分析地区の実験的分類とその結果	99
5.7.1	判別関数の判別能力と分類精度	101
5.7.2	U S A S手法による分類結果とあいまい度の尺度	107
5.8	考 察	112
5.8.1	図形表示適用への考察	112
5.8.2	地表クラスの分類結果の考察	112
5.9	結 語	114
	参 考 文 献	116
第 6 章	結 論	119
	参 考 文 献	121
	付 録	122

第1章 緒 論

1.1 MSSによる地物判定の意義

従来、地表の諸現象・物体などを広域に調査するには、航空機にカメラを搭載して写真を撮影する写真測量技術が利用され、この写真から地形とそこに共存する植生、人工構築物および水などの調査や地図作成などが行なわれ、効果的手段であるとして駆使されてきた。

その理由は下記の特徴を有していたからである。^{1.1)~1.3)}

- 1) 空中写真測量は広域調査に対して地形測量より迅速で経済的である。
- 2) 平面である中心投影写真から地物などの3次元モデルを再現することができる。
- 3) 再現された3次元モデルから均一精度の位置決定が可能である。
- 4) 中心投影写真から正射投影の地図および写真図を作成することができる。
- 5) 写真は保管性と運搬性にすぐれており、机上でも利用しやすい。
- 6) 判読により地表の状況を観察でき、地表の状況と位置との両者の情報源である。

一方、リモートセンシングは宇宙船、人工衛星、航空機などから空間の諸現象や地上の物体の特性を分光波長特性などを利用して、諸現象・物体を間接的に調査する手法の総称である。したがって、このリモートセンシングには写真測量による調査法も含まれることになるが、写真測量とは基本的に異なる調査法を含んでいる。その代表的な手法に用いるセンサーがマルチスペクトラルスキャナ(MSS)とサイドルッキングレーダ(SLAR)である。これらのセンサーがカメラと異なる点は、カメラが面記録であるのに対して、MSSやSLARは線走査^{記録}であることである。

ここで、特にMSS調査法と写真測量の調査法の差異と特徴を述べると下記の点に要約できる。

- 1) 写真測量において、パンクロ写真から判読用に効果的であるカラー写真および赤外カラー写真、さらにはマルチバンド写真などが用いられるようになった。この目的は反射エネルギーの波長特性を区分して捕え、被写体をより正確に認識しようとするものであった。MSSはさらに詳細に波長帯域を区分して多チャンネルデータを抽出可能とした。
- 2) MSSは写真測量では抽出不可能な波長域を捕えることに成功し調査波長帯を拡充させた。
- 3) 測量用カメラが面記録であるのに対してMSSは線走査記録のため、抽出データから地物などの位置決定に際してプラットフォームの不安定性が走査線の位置に変動を及ぼすことになるので精度の高い位置決定をより困難にしている。
- 4) 調査物体を分光特性のみでデジタル解析する場合には計算機処理を前提とするため計算

処理用にデータ変換する必要がある。この処理過程の迅速性とデータの質の不変性などにおいて、線走査記録が面記録より勝っている。

これらのことから航空機によるMSSデータを用いて地物の判定・分類を試みれば、土木工学などにおける土地利用図の作成や都市の地域のメッシュマップの作成^{1.4)~1.7)}などに写真測量とは異なった適用性を見出すことができると思われる。ただし、土地利用が細分化された都市域では地物の放射・反射エネルギー特性のみで地物を判定することは困難であり、これまでのところ、データのデジタル処理過程が統一されておらず、ソフトウェアに汎用性をもたせることができなかった。これらの点を改善する意味で都市域のMSSデータを用いて地物の判定と分類の方法を研究することは、今後のMSS調査もしくは、すでに各地域で実施されてきたMSS調査のデータを有効に活用していくために意義あるものとする。

1.2 研究の方針および本論文の内容

航空機によるMSS調査法を用いて地球表面の諸物体を識別・判定・分類する過程を考察したところ、分析地区のMSSデータを解析し地物を判定・分類するには分析地区の地区特性を理解する過程と分析地区の放射輝度をデジタル解析する過程を併用していく必要があることを痛感したので、まず第一に分析地区の特性を理解する段階として、カラー合成写真判読法の研究を行なうことにする。つぎに、MSSデータのデジタル解析をする過程ではリモートセンシングのデータ処理のために開発されたシステムLARSYSを利用して見たところ、土地利用図やメッシュマップの作成などのためには、下記の点の評価もしくは処理過程を設ける必要があることを見出した。

- 1) 地物が混在し複雑な構成をしている都市域のような分析地区を教師付き分類する場合には分析のために必要なトレーニング地区を選定することが非常に困難である。
- 2) 分析地区内でトレーニング地区を選定できる場合、地物の分類項目に対する評価方法がなく、経験的である。
- 3) 地物判定を行なうために所定の分類を実施した結果には誤分類されるものと正しく分類されるものができるから、このような結果から適正さを評価する方法が必要であること。

そこで、現行のデジタルデータ処理システムのなかで、上記の諸点項目を改良することと、それによる効果を明示することにする。そのために、主としてMSSデータとその抽出位置の関係を述べ、MSSデータのデジタル解析に従来の教師なし分類手法と教師付き分類手法を混用したUSAS手法と称する方法を提案して、適用の方法とその結果についての検討をあいまい度の尺度で行なうことにする。

本論文の各章の内容の概要はつぎのとおりである。

第2章では、航空機によるMSS調査を実施するときの特徴を明らかにするために、利用されるプラットフォーム、センサーなどの機器と画像処理に関する一般的事項を記述する。つぎに、MSSデータの物理的性質を明確にするために地物の放射・反射エネルギーとMSSの分光波長応答値の関係を論述する。このMSSの分光波長応答値（チャンネルデータ）の演算式を考察し、チャンネル演算の一般式を提唱する。

第3章では、MSSデータより再生されるMSS画像位置と地上座標位置の関係を明らかにするために、Konecny理論を考察し、この理論を用いてMSS画像の歪の要素（回転要素と平行移動要素）の挙動を調べる。このMSS画像の歪の要素の挙動からMSSの飛行方向のオーバーラップの最小必要量を試算し求める。

第4章ではMSS調査が実施され、分析地区の多チャンネルデータが与えられる状況下で、分析地区を理解するとき、多チャンネルのため判読する対象物を各チャンネルで比較することが困難である。この困難をさけるために簡易な方法の提案とその効果を評価する方法を述べる。

すなわち、まずカラー合成写真の作成法と写真上の地物の判読法を説明し、地物を判定し分類するための識別基準の決定方法を述べる。つぎに、この識別基準を用いて色調コード空間法の適用を試みる。この分類結果の評価尺度として情報理論によるあいまい度の尺度の定義を行ない論述する。上述の色調コード空間法とあいまい度の尺度の実用性を調べるために、実験データを適用して検証をする。

第5章では、従来の地物分類ならびに判定用のデジタル処理システムの欠点を指摘し、その改良をしたUSAS手法の概要を述べ、この処理手順の主要素となるトレーニング地区の選定用図面の作成法、分析地区のクラスと分類項目の検査法、トレーニング地区の画素データの特性調査の段階で必要となる図形表示およびチャンネル選択法について詳細に述べる。

このUSAS手法は2段階に区分されており、各段階の効果を明示するために、都市域における実験データを各処理段階に適用して、USAS手法を使用しない場合と適用した場合の地物分類結果を求め、あいまい度の尺度によってUSAS手法の効果を明らかにする。

以上の各章の結果から得られた成果を第6章でまとめて述べる。

参 考 文 献

- 1.1) B. Hallart ; 'Photogrammetry', Mc Craw-Hill, 1960, p.247 ~ 286.
- 1.2) M. Zeller ; 'Lehrbuch der Photogrammetrie', Orell Füssli Verlag, 1947.

- 1.3) R. Finsterwalder, W. Hofmann ; 'Photogrammetrie', Walter de Gruyter & Co.
1968.
- 1.4) 建設省国土地理院 ; “メッシュ・マップに関する調査,” 1969. 2, p.1 ~ 41.
- 1.5) 星 仰 ; “メッシュ法による情報保持について,” 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 1973. 6, p.Ⅳ39 - 1 ~ 2.
- 1.6) 星 仰 ; “格子法による都市情報のデータ保管の有効性について,” 土木学会年次学術講演会講演概要集 IV, 1973. 10. p.89 ~ 90.
- 1.7) 総理府統計局 ; 地域メッシュ統計地図,” 1972. p.1 ~ 6.

第2章 リモートセンシングの概要とチャンネル演算

2.1 概 説

写真測量は航空カメラや図化機の開発と相互標定理論の発展などに依存してきたが、ライト兄弟による飛行体の出現と飛行体の発展に起因してきたともいえよう。リモートセンシングはこのような意味においては全世界を驚嘆させたスプートニク 1 号の出現に端を発したともいえよう。衛星の歴史は 1957 年 10 月 4 日にスプートニクが軌道に乗って以来、わずか 20 年を経過したにすぎない。しかし、この間に人類は月面に人類を送り、火星・金星などの太陽惑星にまで観測器材を送り込み、新たな情報を刻々と地上に送信してきている。^{2.1)}

一方、地球表面へ視点を向けると、このリモートセンシング技術は諸外国の地方、国家レベルの水資源、^{2.2)} 地質、^{2.3)} 地下資源、^{2.4)} 気象、^{2.5)} 海洋、^{2.6)} 土地利用、^{2.7)} 農業、^{2.8)} 林業、環境などの研究段階へと進展してきており、たとえば、

- 1) 農業分野においては国連気象機構が収獲予想調査をすること。
- 2) 気象分野においては国連気象機構と国際学術連合会議が共同で国際的気象実験を行うこと。
- 3) 環境分野においては国連環境計画として地球環境モニタリングシステムによる観測をすること。

などを衛星を利用して研究していくことになっている。また、LANDSAT-A, B を基礎にして LANDSAT-C, SEASAT の衛星打上げ計画が行なわれてきている。

わが国のリモートセンシングの歴史をたどれば、1960 年後半より NASA などのリモートセンシングに関する文献紹介が気象・地質分野などで行なわれ始めた。その後、資源衛星 ERTS-1 の 70 mm フィルムや磁気テープに保管された MSS データが入手され、このデータを用いて画像解析やデータ分析が実施されて土地利用図の作成などが行なわれてきた。^{2.8)} 一方、航空機による MSS 調査は主として衛星データを有効に活用するための補助的手段として研究されてきたといえよう。特にパデュー大学やミシガン大学などでは農業・環境調査の研究を進展させてきており、わが国でも、その研究成果の紹介が当初行なわれてきた。その後 1960 年代後半に入り、スキャナと地上ステーション装置（フォトラボ、画像処理装置など）が輸入され、主として沿岸調査が行なわれてきている。

現在ではスキャナ、AD 変換機、CCT クイックルッカ、カラー合成写真作成機、バルク画像作成機、CCT フォトプリンタなどの国産化がすてになされるに至った。

一方、ソフトウェアでは、米国のネットワークで使用されている LARSYS（パデュー大学の

リモートセンシング応用研究所で開発されたりモートセンシングデータ処理システム)が諸外国でも使用されており、わが国では昭和51年から輸入され利用されている。このほか、小型計算機システムと画像処理装置との共体してのソフトウェアも輸入されている。これらのソフトウェアをさらに発展させ改良するために、近年わが国でも開発されてきている。

現在までの諸外国の状況から察すれば、航空機をプラットフォームとするリモートセンシングは衛星によるリモートセンシングの実験にすぎない感もあり、^{2,9)} 将来航空機によるリモートセンシングは不用になるとも言われている。この理由は中心投影の写真測量に比べコスト高となる点、衛星画像の解像力が向上する点などであろう。そこで、衛星の利用できる範囲を国際レベルで考察してみると国有面積が広大であること、人口が多いこと、未開発地域を十分国内に有することなどであろう。これらの条件を考慮しながらわが国のリモートセンシングの適用性を考えてみると、わが国は人口が多く、都市部では過密化し土地利用の時系列調査や環境調査を必要とする。また、台風、地震の影響を受けるため各種構築物の被害調査も必要である。したがって、海洋・気象以外に内陸でのリモートセンシング技術の活用が期待される。内陸の都市域では地物が混存しており、衛星のマクロ調査と同時にミクロな調査が必要になってくるのは必然であろう。このような理由により、わが国では衛星と航空機から抽出したデータをともに利用していくと考えられる。

そこで本章では航空機によるMSS調査に焦点を絞るために、プラットフォームによるリモートセンシングの一般論として人工衛星と航空機の利用範囲に触れ、都市域の地物判定に航空機による調査の必要性を示す。航空機のセンサーとしては最近注目されているMSSとサイドルッキングエアボーンレーダ(SLAR)があるため、これらの特徴を述べる。

つぎに、航空機によるMSS調査においては調査対象が地物である場合、MSSデータは地物の位置とその分光放射・反射特性であるから、地物の位置の歪の問題については第3章に譲ることとし、地物の放射・反射エネルギーとMSSに届く放射輝度の関係を物理的理論で示す。この放射輝度をMSSの応答としたとき、各分光波長帯域ごとにMSSの応答が異なった値(チャンネルデータ)を示す。このチャンネルデータを用いてMSS画像を作成するので、チャンネルデータとフィルムの透過率の関係を示す。

以上のことから地物の反射率および放射率とMSSのチャンネルデータの関係が明らかにされたのでパスラジアンズ除去などに必要な近似的チャンネル演算式を示し、チャンネル演算の一般式を提案する。

2.2 プラットフォームによる分類

2.2.1 人工衛星によるリモートセンシング

人工衛星によるリモートセンシングは調査対象別に、地球を対象にする場合と地球以外の惑星を対象にする場合とに分類されるが、ここでは地球表面を対象にしたものに限定して述べる。

衛星による大気圏外からの観測は天気予報をより正確にすること、未だ図化しえなかった熱帯地区を図化すること、氷河の発見や氷雪量を推定すること、および地質構造を解読することなどのマクロ調査に効果を示してきている。これらの調査研究の中で図化の研究は、面積の広い米国・ソ連・カナダ・ブラジル・オーストラリアなどで注目され、小縮尺図の作成例をすでに示している。^{2.10)} 図化をするには高々度における静止衛星を利用する方法と一定周期で一定地点の上空を通過する衛星を利用する方法などがある。前者は高々度静止衛星とも呼ばれ、対地高度約 35,800km で時系列データを地上で受信できる特徴を有している。後者は中高度衛星とも呼ばれる対地高度 350 ~ 1,500 km の太陽同期衛星は同地域を反覆観測でき、すでに周知の資源衛星 LANDSAT-A, B や気象衛星 TIROS, ESSA, NIMBUS および NOAA (ITOS) などがこれに該当する。

これらの中で LANDSAT-A, B による画像は 70 mm 角で縮尺約 1/3,370,000 のものが利用者に供給されている。この MSS 画像は同一地区に対し、0.5 ~ 0.6 μm (青)、0.6 ~ 0.7 μm (緑)、0.7 ~ 0.8 μm (赤) および 0.8 ~ 1.1 μm (近赤外) の 4 バンドの調査波長帯によって得られたデータから作成されるものである。この衛星画像を実用化していくために画像処理技術の進歩などもあり、画像濃度を利用した定性的・定量的分析がなされ、地図作成などにもその実例を見ることができ。^{2.11)} つぎに、地図作成などに利用する画像からの情報抽出以外でも空間の諸状態を実験的に調査して環境の監視などにレーザ散乱計、放射計、分光計、高度計などの種々の計測器によって調査を進め、NASA やヨーロッパ諸国におけるがごとく宇宙観測所の役割^{2.12)} を明示しようとする方向性もみられる。したがって、宇宙実験所の役割は単に地球や他の惑星の情報抽出とその専門分野での分析という狭い範囲での論議の積み重ねから、宇宙資源の総合的管理がなされつつあり、従来調査管理の不可能であった広域に分布する、しかも雲に覆われた地域や、北極・南極における氷河の管理、大気空間を汚染する地点や国の管理、国際的的海洋領域や漁業制限などに関連する船舶の監視などに視点が向けられてきている。

人工衛星を人類の平和利用に役立てるためにはマクロ的位置から高精度の情報をリアルタイムに供給しえるシステムが必要とされる。このシステムを用いて高精度の情報抽出には衛星と航空機の調査データの対比が必要であり、同時観測が以前は米国・ソ連を中心に国家レベルで実施されていたが、最近では国際協力によって実施可能となってきた。^{2.13)} このような意味でわが国の気

象衛星GMSは上記の国際協力による衛星として、わが国はもとよりオーストラリアなど諸近接国から注目されている。

ところで、人工衛星の画像から地表面の標定点の位置精度を検討するには人工衛星より供給される画像の解像力が問題となりチャンネル別の情報抽出精度に影響してくる。諸探査計測機の改善によって解像力もまた改良されつつあり、LANDSATやNOAA画像について示せば、LANDSAT-1では瞬時視野角 0.086 mrad であるから地上で約 80 m の解像力になる。NOAAでは衛星直下において、可視光チャンネル $0.6\sim 0.7\text{ }\mu\text{m}$ 波長帯の解像力は 4 km 、赤外チャンネル $10.5\sim 12.0\text{ }\mu\text{m}$ の解像力は 7.5 km である。

Bàher Wong, Forrest, Bernsteinらは衛星画像から地表XYの誤差を求め、1画素約 80 m の解像力をもつバルク写真や磁気テープ保管データでは1画素の半分程度である。^{2,14)}

この研究成果からも衛星データは都市域の地物などのミクロな調査には適さず広域なマクロ調査に応用すべきである。また、衛星データを正確に利用するには航空機データと対応させていく必要がある。

また、解像力の高い資源衛星の中間赤外線域（熱線バンド）のデータ抽出は今後の衛星に期待せざるをえないのが現状である。

2.2.2 航空機によるリモートセンシング

地球表面を低空から調査する対象物は、気象、海洋および地上の地物に区分できる。これらの中で地物調査に航空機を利用する場合、下記の方法がある。

- 1) 飛行データを主データとして使用するために航空機を利用する方法。
- 2) 飛行データを衛星データの補助データとして使用するために航空機を利用する方法。

ここでは、項目1)の方法に限定して述べる。航空機による地物調査法は一般にグラウンド・トゥールズと呼ばれている地上調査を伴なう。地上調査は時間的・経済的制限を受けるため、あらかじめ指定された地上観測点の地物の分光特性などをデータとして抽出する。このデータを最確値として採用して、飛行データの補正を行ない、分析地区の解析を行なう。

いま、地上データの時間的制限を受ける理由として地物の分光特性に関係する要因を例に掲げて説明すると、植生では生育条件、季節・月日・時刻および降雨などによる水分量などが植生表面の反射率に影響する。土壌・土質では太陽の位置による反射率変化、降雨や地下水位による含水比の変化が地物判定に影響を及ぼす主要因子である。^{2,15)} 人工的諸建造物では植生・土壌に比べ調査時刻、降雨などの影響は少ないが、これらが放射・反射率に影響することは確かである。水域では水質調査、水中混合物の散乱、水温などが刻々と変化する。これらのことから理解でき

るように地物調査を上空から実施するには限られた時刻に迅速に調査をする必要がある。さらに、地上の地物の分光特性を機上で抽出する間にはパスラジアンスの問題、あるいは大気中のガスなどの影響を受けるため、これらの各要因を調査ごとに調べる必要性も出てくる。それはほとんど不可能に近い。そこで、簡略的に飛行データ（放射輝度）を補正するために地上のデータ（グラントウールス・データ）をごく限定した地点で求め、飛行データと地上データを対応づけることが実施されるわけである。

この方法の実例を掲げると、水面や陸上での温度を数ヶ所で計測し、この地上データ値と同所同時刻の飛行走査線データ（中間赤外線域）のレベル値とを対応させて、水面や陸地内の等温線図を作成する方法がある。

ここで、土木工学分野などで迅速処理を必要とする土地利用の時系列調査、天災などによる被害調査および工事予定地区の調査などの航空機調査を考えてみる。従来の写真測量では写真の入手はかなり迅速にできてもデータ処理は独立した処理システムであるため、判読利用として写真を利用する傾向があった。しかし、リモートセンシング技術を用いた航空機によるMSS調査では機上でデータをアナログテープに保管しているため、機上もしくは地上で、画像あるいは磁気テープをリアルタイムで作成することができる特徴がある。また、迅速性を要求するデータに対する地上データはほとんど得られないのが一般的と考えねばならない。

これらのことから航空機によるリモートセンシング（たとえばMSS調査）は即時利用の場合には航空写真との同時調査する方法、即時的でなく事前に準備期間のある場合で、しかも精度を要求する場合には、航空写真と地上調査を併用する方法が適当と考える。特に前者はリアルタイム処理にすぐれ、地上調査を行わないため経済的である。この点に着目して、この方法で航空機によるMSS調査を実施し、精度を向上させる目的で、土木工学でよく対象となる都市域の地物判定を行なってみる。この地物判定のためのデータ抽出をする航空機によるリモートセンシングは種々のセンサーが現存しているため、MSSの位置づけを明確にする意味で次節においてセンサーの分類を行なう。

2.3 センサーによる分類

リモートセンシングの調査器材（センサー）は調査対象物の位置とそこに存在する対象物の特性をデータとして抽出する目的に使われ、その種類を図23-1に示すごとく受動式と能動式に区分することができる。前者は太陽光などを利用してデータを抽出するのに対して、後者は調査物に特定の波長を送信し、その反射波を抽出するものである。以下、これらを航空機に限定して述べる。

(1) 受動式センサー

受動式リモートセンサーの代表的なものはMSSであるが、調査時によく使用されるアマチュアカメラ、写真測量、マルチバンドカメラなどもリモートセンシング調査によく使用されるのでこれらについて説明する。

アマチュアカメラは地物の詳細な判読用として、パデュー大学のLARS (Laboratory for Application of Remote Sensing, 以前はApplication of Agriculturalであった) などでも

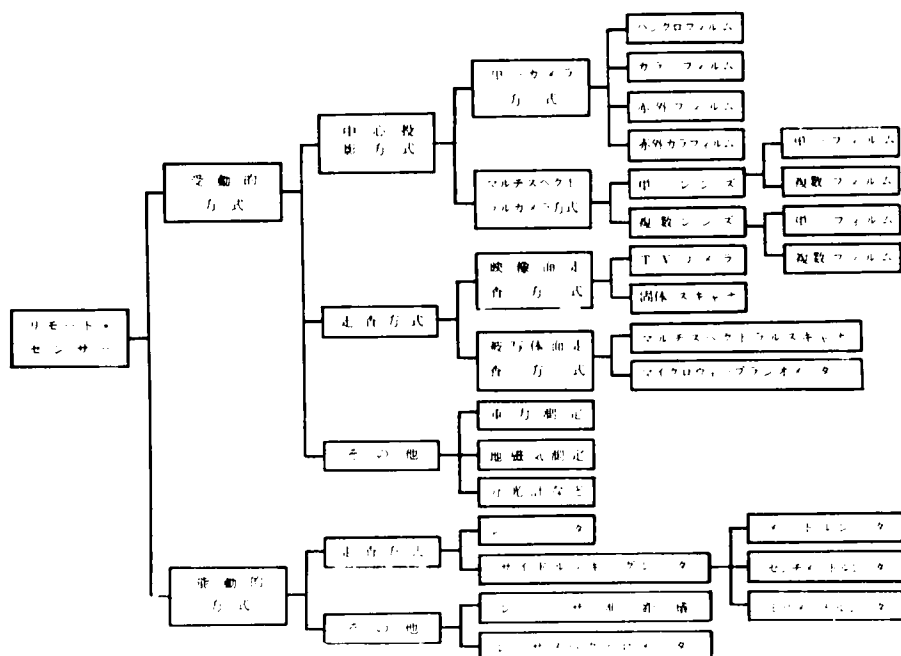


図 23-1 センサーの分類

使用され、微視的あるいは巨視的調査研究^{2.16)}の補助手段で地上、チェリーピッカ^{2.17)}、軽飛行機上から撮影でき、魚眼レンズなどの使用^{2.18)}も考えられるので用途は広い。

写真測量用カメラは内部定位が高精度で定められており、歪曲収差も無視できるほど小さいので、このカメラにより撮影された航空写真は地図作成に利用される。これ以外の航空写真の用途としては下記のものなどがある。

- 1) 反射実体鏡による観察と比高測定。
- 2) モザイクの作成と判読。
- 3) カラー航空写真の色分解と分布抽出。
- 4) オルソフォトの作成。
- 5) 白黒航空写真の濃度測定による分布抽出。

マルチカメラには、マルチスペクトラルカメラとマルチバンドカメラが含まれている。マル

チスペクトラルカメラは単一レンズを通った光線がダイクロイックミラーなどで分光され、複数の写真を同時に撮影する。マルチバンドカメラは4ないし9個のレンズを有しフィルター特性^{2.19)}を利用して1枚のフィルム上に4～9個の像を作るものである。MSS画像に比べ位置精度は高いがデジタル処理をする場合は処理が面倒である。

以上のカメラによる写真を計測に使用するときは光量補正をするとさらに鮮明な写真が得られる。^{2.20)}

マルチスペクトルスキャナ(MSS)は位置精度に主眼をおいた調査に使用されるのではなく、調査物の分光特性を正確にデジタルで抽出することが目的である。したがって、分光特性のデータから調査物を判定しても、位置合わせをアフィン変換などで行なわないと実用的な分類図などが作成できない。

MSSの特徴は、上述のカメラが中心投影法を採用し抽出波長がフィルム感度で制限されていたのに対して、走査鏡(センサーミラー)が回転する間に地上の情報を抽出するので帯状に走査

表 23-1 受動方式MSSのチャンネル波長帯

器材名 チャンネル	ディダラス 11バンド	ミシガン M-7	バンディックス 9バンド	バンディックス 3100	JSCAN AT-12M	IARS実験 用スキャナ
0	—	—	—	—	0.25 ~ 0.35	—
1	0.38 ~ 0.42	0.40 ~ 0.48	0.38 ~ 0.44	0.41 ~ 0.42	0.35 ~ 0.40	0.40 ~ 0.44
2	0.42 ~ 0.45	0.46 ~ 0.49	0.44 ~ 0.50	0.46 ~ 0.47	0.40 ~ 0.45	0.46 ~ 0.48
3	0.45 ~ 0.50	0.48 ~ 0.52	0.50 ~ 0.56	0.51 ~ 0.52	0.45 ~ 0.50	0.50 ~ 0.52
4	0.50 ~ 0.55	0.50 ~ 0.54	0.56 ~ 0.62	0.56 ~ 0.60	0.50 ~ 0.55	0.52 ~ 0.55
5	0.55 ~ 0.60	0.55 ~ 0.60	0.62 ~ 0.68	0.60 ~ 0.64	0.55 ~ 0.60	0.55 ~ 0.58
6	0.60 ~ 0.65	0.58 ~ 0.64	0.68 ~ 0.74	0.64 ~ 0.68	0.60 ~ 0.65	0.58 ~ 0.62
7	0.65 ~ 0.69	0.62 ~ 0.70	0.74 ~ 0.86	0.68 ~ 0.72	0.65 ~ 0.69	0.62 ~ 0.66
8	0.70 ~ 0.79	0.67 ~ 0.94	0.86 ~ 1.00	0.72 ~ 0.76	0.69 ~ 0.79	0.66 ~ 0.72
9	0.80 ~ 0.89	1.00 ~ 1.40	1.00 ~ 1.20	0.80 ~ 0.90	0.79 ~ 0.89	0.72 ~ 0.80
10	0.92 ~ 1.10	1.50 ~ 1.80		1.00 ~ 1.10	0.92 ~ 1.10	0.80 ~ 1.00
11	8.0 ~ 14.0	2.00 ~ 2.60		1.50 <	8.0 ~ 14.0	1.00 ~ 1.40
12		9.3 ~ 11.4				2.00 ~ 2.60

注) JSCANは国産である。

することになる。また、検出波長も0.25～14.00 μm と紫外線域から中間赤外線域へと広い波長域を抽出することができる(表23-1参照)。

本章の実験データにはMSSにより抽出されたデータを用いるために2.4において波長帯別のチャンネルデータの物理学的関係を明確にして論述するのでここでは省略する。また、位置誤差についてKonecny, Liebig, Derenyi, Báherなどの実験によれば飛行方向Xと走査方向Yの誤差は約2画素程度である。これらのことから、写真測量に比べてMSSの衛星画像は少なく

とも誤差が2倍となり、航空機のMSS画像の場合は少なくとも10倍程度となる。^{2.14)}

(2) 能動式センサー

航空機による能動式センサーの代表的なものはSLAR(Side Looking Airborne Rader)である。このSLARの特徴は天候による影響(雷雨を除く)や時間的制約(夜間でも調査可能)^{2.21)}がない。SLARの種類とその調査波長域は表23-2に示したごとくMSSに比べ長い波長であり、電波障害を起す欠点もある。偏波特性(垂直偏波Vと水平偏波H)を使うレーダによる地上位置での分解能 r は対地高度 h 、アンテナ長 d 、ビーム幅の角 θ などの関数($\theta = \lambda/d$, $r = h\theta$)^{2.22)}で与えられる。図23-2は $h=10\text{ km}$ における各 λ における d と r の関係試算したもので、アンテナ長を大きくすると分解能が高まることを示している。

最近では米国で合成開口レーダ(Synthetic Aperture Rader) SARが開発され、^{2.23)}走査方向の分解能を高めるコンプレッション技術(SLARで使用)に、飛行方向の分解能を高めるドブラー効果を利用した技術を加えて分解能をより高め、解像力の高い画像が得られるようになった。

このSARは民間利用も可能となり米国では氷河の位置、船舶の監視、地質工学や土木工事の設計調査およびブラジルの未開発地区の地図作成^{2.24)}などに応用されてきている。

ところで、レーダによる調査方法には図23-3の左右両側法と片側法とがあり、^{2.25)}実体視用調査法の中に等高度法と異高度法(図23-4)がある。表23-3は異高度法(図23-4)において $h_1 = 6250\text{ m}$, $h_2 = 2500\text{ m}$, $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 26^\circ$, $\theta_3 = 14^\circ$, $\theta'_1 = 45^\circ$, $\theta'_2 = 11^\circ$ および $\theta'_3 = 6^\circ$ を与えて対地調査幅を試算したものである。この場合、オーバーラップ率は h_1 で93.2%, h_2 で82.4%である。この方法はMSSや航空カメラでは実施されないものである。

表23-2 SLARのバンド特性

名称	周波数範囲	波長域
EHF	30 GHz以上	10 mm以下
Ka	26.5~40 GHz	0.75~1.13 cm
K	18.0~26.5 GHz	1.13~1.66 cm
Ku	12.5~18.0 GHz	1.66~2.40 cm
X	8000~12500 MHz	2.40~3.75 cm
C	4000~8000 MHz	3.75~7.50 cm
S	2000~4000 MHz	7.5~15 cm
L	1000~2000 MHz	15~30 cm
UHF	300~3000 MHz	10~100 cm
VHF	30~300 MHz	1~10 m

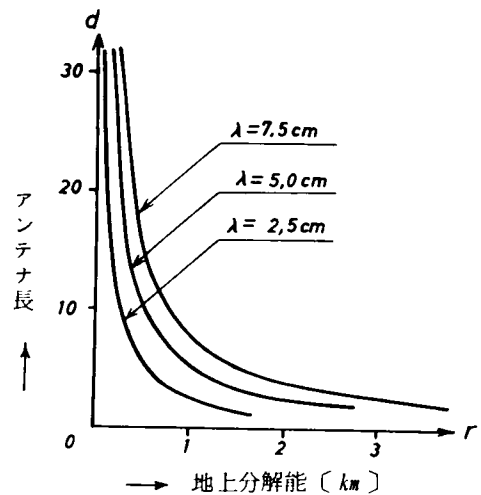
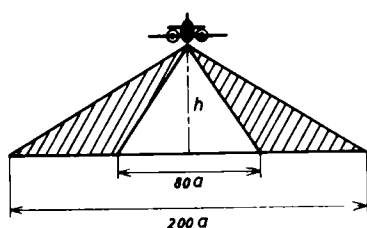
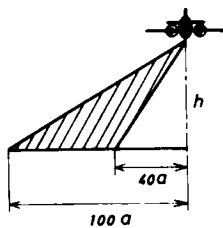


図23-2 アンテナ口径と分解能
($h=10\text{ km}$)



(a) SLARの両側調査法



(b) SLARの片側調査法

図 23-3 SLARの調査法の種類

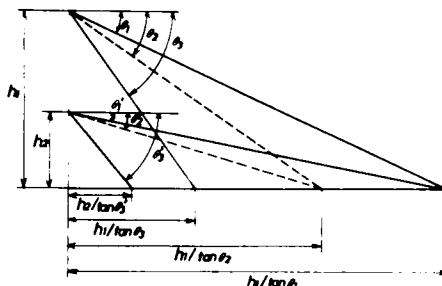


図23-4 異対地高度の調査法

2.4 地物の放射・反射エネルギー特性

2.4.1 MSS 画像の基礎理論

(1) 中間赤外線の基本理論

太陽光線の吸収を完全になすものを黒体といい、この黒体が放射するエネルギーに関する法則すなわち Planck の法則は単位面積、単位波長間隔当りの波長 λ で黒体から半球内に放射される分光放射発散度 W_λ が波長 λ の関数で表現され、式 (24-1) で与えられる。

$$W_\lambda = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} [\exp(ch/\kappa \lambda T) - 1]^{-1} \quad \dots\dots\dots (24-1)$$

上式は真空中における関係を示したもので
空気中でのそれは空気の屈折率 n を考慮して
式 (24-2) とすることができる。

$$W'_\lambda = n^2 W_\lambda \quad [W \text{ cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}] \quad \dots\dots (24-2)$$

ところで分光放射発散度と波長との関係は

温度 T によって図24-1の傾向があることがすでに明らかにされており、絶対温度が高くなるにつれて分光放射発散度の最大値は増加し、この時の波長 λ_m は次第に小さな値をとることになる。任意の絶対温度 T における W_λ の最大値は $\partial W_\lambda / \partial \lambda = 0$ からえられ図24-1の破線となり式 (24-3) の関係となる。

$$\lambda_m = 2897.8 / T \quad [\mu\text{m} \text{ K}^{-1}] \quad \dots\dots\dots (24-3)$$

上記の関係をふまえて、黒体の単位表面積

表 23-3 SLARの視界距離の例

h	$h/\tan\theta_1$	$h/\tan\theta_2$	$h/\tan\theta_3$
6250	6250	12814	25067
2500	2500	12861	23786

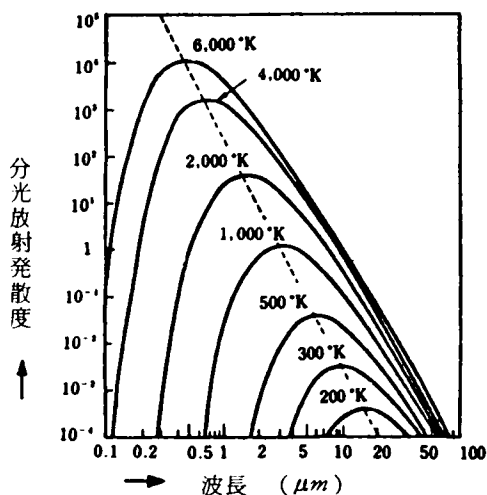


図 24-1 波長と分光放射発散度の関係

から単位時間に半球面内に放射されるエネルギーとしての放射発散度 W は絶対温度 T の4乗に比例することがStefanによって実験され、Boltzmannによって論理づけられた。これが式(24-4)である。

$$W = \int_0^{\infty} W_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad \dots\dots\dots (24-4)$$

式(24-4)の黒体に対するものから灰色体の放射発散度 W' を求めるには放射率 ϵ が考慮され、式(24-5)となる。

$$W' = \epsilon W = \epsilon \cdot (2\pi^5 \kappa^4 / 15 c^2 h^3) \cdot T^4 \quad \dots\dots\dots (24-5)$$

ここに κ 、 σ はBoltzmann定数、 h はPlanckの定数、 c は光の速度である。式(24-5)

において灰色体を地物とし、 T を地表面物体の温度とすれば、地表物体の分光発散度 W' は地物の温度と関係づけられる。^{2.26)2.27)} つぎに、大気中の各種ガス吸収や粒子の散乱を考慮する必要がある。図24-2は大気中のCO, CH₄, N₂O, O₃, CO₂, H₂Oによって透過率 τ が波長 λ によって異なることを示したもので、この図から可視光線領域では雲の影響を受け、中間赤外領域では雲の影響をさほど受けないことがわかる。

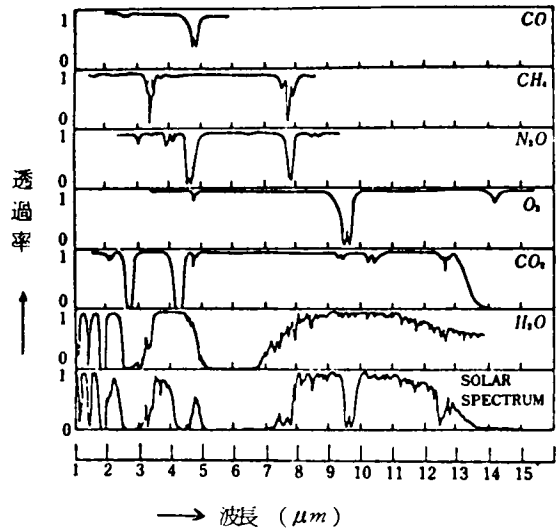


図24-2 波長とガスの透過率の関係

(2) センサーに入力する放射輝度

太陽光線がMSSのミラーに到達する過程を想定すると、大気中の透過率 τ やパスラジアン^{2.28)~2.32)}ス N_p の影響を受けるため、センサーに入力する分光放射輝度 N_{λ} は太陽光線照度 H ならびに天頂距離 θ_s などから式(24-6)が得られる(図24-3参照)。

$$N_{\lambda} = \tau \left\{ \int_{\lambda_i}^{\lambda_f} (H\tau_0 + H_s k_{\lambda}) \rho_0 \cos \theta_s dQ + W\epsilon \right\} + N_p \quad \dots\dots\dots (24-6)$$

式(24-6)の天空光 $H_s k_{\lambda}$ が $H\tau_0$ に比べて少なく省略してもさしつかえない場合には、センサーミラーに入力する分光放射輝度 $N(\lambda)$ は次式で近似することができる。

$$N(\lambda) = \frac{1}{\pi} H(\lambda) \rho(\lambda) \tau(\lambda) \cos \theta_s + N_p(\lambda) \quad \dots\dots\dots (24-7)$$

センサーに入力後の分光放射輝度 N'_λ はセンサー損失や雑音などの影響を受けるため式(24-8)となる。

$$N'_\lambda = K \cdot N_\lambda \quad \dots\dots\dots (24-8)$$

ここに、 K は集光面積に関する係数 k_1 、センサー損失の係数 k_2 、センサーの雑音の係数 k_3 の積として式(24-9)で与えることができる。ただし、 r は地表位置に対する変数である^{2.33)}。

$$K = k_1(r) k_2(r) k_3(r) \quad \dots\dots\dots (24-9)$$

ところで、MSSのミラーの面積 A と N_λ などから電磁波のパワー P は式(24-10)となる。ただし、 β は瞬時視野角である(図24-4参照)。

$$P = N_\lambda \cdot A \beta^2 \Delta\lambda \quad (\Delta\lambda = \lambda_n - \lambda_{n-1}) \quad \dots\dots\dots (24-10)$$

いま、地表物体が反射強度の大きいもので放射量を省略しうるものについて限定し、 $\rho(\lambda)$ の平均二乗誤差 m_ρ が他の要因の誤差に比べて顕著に大きいとするならば $\rho(\lambda)$ 以外の誤差を省略することができるため、式(24-11)の関係から式(24-12)が成立つ。

$$\frac{m_p}{P} = \frac{m_N}{N(\lambda)} = \frac{m_\rho}{\rho(\lambda)} \quad \dots\dots\dots (24-11)$$

$$m_p = \frac{1}{\pi} H(\lambda) \tau(\lambda) \cos \theta_s \cdot \Delta\lambda \cdot m_\rho \quad \dots\dots\dots (24-12)$$

上式は可視光線領域の波長帯を対象にしたものであるが、さらに長波長領域においては N_λ は ϵ と W の影響を受けることから式(24-11)と同様に式(24-13)が得られる。

$$\frac{m_N}{N(\lambda)} = \frac{m_\epsilon}{\epsilon} \div \frac{m_W}{W} \quad \dots\dots\dots (24-13)$$

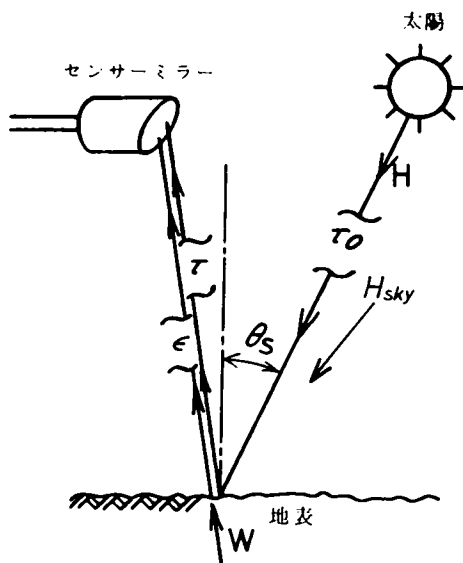


図24-3 放射・反射量の経路図

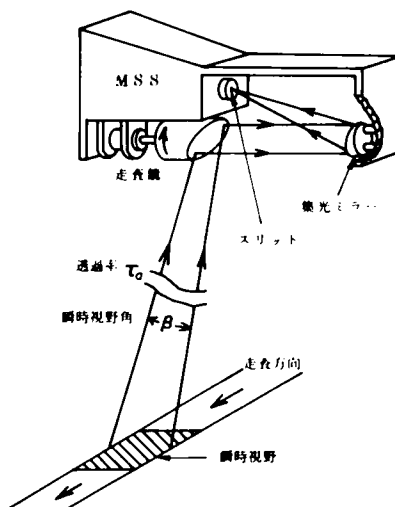


図24-4 MSSの走査鏡と対地走査の関係

式(24-5)から式(24-13)を変形すれば次式が得られる。

$$\begin{aligned}\frac{m_N}{N(\lambda)} &= \frac{m_\epsilon}{\epsilon} + \frac{14,388}{\lambda T} \cdot \frac{e^{14,388/\lambda T}}{e^{14,388/\lambda T_1}} \cdot \frac{m_T}{T} \\ &= \frac{m_\epsilon}{\epsilon} + \frac{14,388}{\lambda T} \cdot \frac{m_T}{T} \dots\dots\dots (24-14)\end{aligned}$$

したがって、センサーミラーに入力するパワー P の誤差 m_p が得られる。^{2,34)}

$$m_p = \frac{m_\epsilon}{\epsilon} P + \frac{14,388}{\lambda T} \cdot \frac{m_T}{T} P \dots\dots\dots (24-15)$$

以上のことからMSSのチャンネル情報の中で中間赤外領域の8～14 μm の波長帯については式(24-15)を適用することができる。

この m_p を求めることによってMSSの S/N 比などが算出できるので、データの実用性を検査することもできる。

(3) 地物の放射輝度とMSSの出力電圧

センサーの開口部に入力する分光放射輝度 $N(\lambda)$ は0.4～1.5 μm の波長域において反射率の項によって $N(\lambda)$ が影響されることをすでに述べてきた。この波長域にあるチャンネル i の等価分光平面放射輝度 $\bar{N}_i(\lambda)$ は式(24-7),(24-8)とチャンネル i の分光感度分布などから式(24-16)の関係が成立つ。

$$\bar{N}_i(\lambda) = K \int \left[\frac{1}{\pi} H(\lambda) \rho(\lambda) \tau(\lambda) \cos \theta + N_p(\lambda) \right] S_i(\lambda) d\lambda / \int S_i(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots (24-16)$$

MSSのチャンネルの最小基準電圧 V_0 に \bar{N}_i とゲイン G_i ならびにレスポンスビリティ R_i の積を加えることによってMSSの出力電圧 V_i を決定することができる。

$$V_i = R_i G_i \bar{N}_i(\lambda) + V_0 \dots\dots\dots (24-17)$$

いま、地表面の放射輝度の変動幅 w_N 、MSSの出力電圧の変動幅 w_V とすれば式(24-17)は次式のように変形される。

$$V_i = R \frac{w_V}{w_N} \bar{N}_i(\lambda) + V_0 \dots\dots\dots (24-18)$$

したがって、地表物体の反射率 $\rho_{i1}, \rho_{i2} \dots\dots\dots \rho_{in}$ からMSSの出力電圧 $V_{i1}, V_{i2} \dots\dots\dots V_{in}$ を既知量としたとき式(24-19)の一次線形方程式より正規方程式を求めて、係数 $\alpha_1(\lambda)$, ~~$\alpha_2(\lambda)$~~ , $\alpha_2(\lambda)$ を決定することができる。

$$V_i = \alpha_1(\lambda) \rho(\lambda) + \alpha_2(\lambda) \dots\dots\dots (24-19)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1(\lambda) &= \frac{n[\rho V] - [\rho][V]}{n[\rho\rho] - [\rho]^2} \\ \alpha_2(\lambda) &= \frac{[\rho\rho][V] - [\rho][\rho V]}{n[\rho\rho] - [\rho]^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24-20)$$

通常 V_i はMSSのデータを、 ρ_i はグラントゥルースのデータを用いるのが普通である。

式(24-18)を変形してプラットフォーム上で得られる基準温度の上限、下限の差を w_B とすれば式(24-21)となる。

$$V_i = G_0 \cdot \bar{N}_i(\lambda) + V_0 = \bar{N}_i(\lambda) w_V / w_B + V_0$$

上式の V_i を用いて画像化する場合、フィルムの透過率 T は透過率変動幅 w_T とMSSの電圧変動幅 w_V などから式(24-22)が導かれる。

$$T = V_i w_T / w_V + T_0 \dots\dots\dots (24-22)$$

ここに、 T_0 はMSSの出力電圧 $V_i = 0$ のときの初期透過率すなわち最小透過率である。

処理装置によって多少の変動はあるが出力電圧幅を ± 2 以内とした場合、フィルムの透過率 T は0.04～0.5の範囲に納められる。また、光学濃度 D は0.3～0.7の範囲で処理されている。

MSS画像は通常MSSの出力電圧をFMテープにアナログ波形として保管しており、地上に持ち帰られてFMテープ再生器材によって画像化できる。

画像作成器材の中には単一のチャンネルを画像化するものや、複数のチャンネルを演算した結果を画像にすることもできる機能を備えたものもある。図24-5は画像作成の概略を示したものである。

MSS画像の作成時に考慮されることは、MSSのミラーが回転するため地表情報を抽出したものをそのまま再生すると、センサー直下の位置に比べて走査幅の両端では大きな歪を生じ、両端に近いほど縮小される(図24-6参照)。すなわち、 $\overline{O_1}$ を半径とする仮想球面[B]に地表[A]が投影されたことになり、この仮想球面上のデータがFMテープに記録されている。このデータを再生すると[C]の範囲で地表の放射輝度を表わすことができる。このデータの位置合わせには、走査方向 Y について $\tan\theta$ 補正を必要とする。しかし、実用性、経済性から、図24-6[D]のような近似的段階補正が行なわれてい

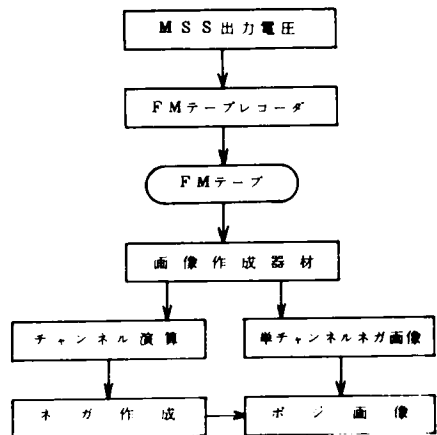


図24-5 MSS画像の作成過程の概要

るのが現状である。

つぎに、飛行速度とフィルム送り速度の比によって再生画像が飛行方向に伸縮するため、式(24-23)の関係を保つ必要がある。

$$W_{gr}/V_{fly} = w_{film}/v_{film} \cdots (24-23)$$

ここに、 W_{gr} ：対地走査幅、 V_{fly} ：飛行速度、 w_{film} ：フィルム幅、 v_{film} ：フィルムの流し速度である。

第4章で使用するMSS画像は上述のごとく、走査方向Yは近似的段階補正を行い、飛行方向Xは式(24-23)が成立つようにして作成したものを使用する。

なお、走査方向Yの厳密補正と飛行条件による位置補正については、改めて第3章で詳述する。

2.4.2 チャンネル演算の一般式

航空機に搭載されたMSSに入力する分光放射輝度 N_λ が地物の反射・放射率やパスラジアンによって関係づけられることを述べ、式(24-7)の近似式などを示してきた。この $N(\lambda)$ から地物の反射率を抽出するために下記の場合に分けて反射率 ρ と放射輝度 $N(\lambda)$ の関係式を導いてみる。

- (1) パスラジアンが式(24-7)の第1項に比べて無視できる場合。
- (2) パスラジアンが式(24-7)において無視できない場合。

まず、(1)ではチャンネル i 、 j の比によって式(24-7)の反射率以外の要素を取り除くことができる。

$$N_i(\lambda)/N_j(\lambda) = \rho_i(\lambda)/\rho_j(\lambda) \cdots (24-24)$$

つぎに、(2)の場合はチャンネル差によってパスラジアンを除去ができることに注目すれば式(24-25)から式(24-26)を導くことができる。

$$N_i(\lambda) - N_j(\lambda) = H(\lambda)\tau(\lambda)\cos\theta_s \{\rho_i(\lambda) - \rho_j(\lambda)\} \cdots (24-25)$$

$$\frac{N_i(\lambda) - N_j(\lambda)}{N_k(\lambda) - N_e(\lambda)} = \frac{\rho_i(\lambda) - \rho_j(\lambda)}{\rho_k(\lambda) - \rho_e(\lambda)} \cdots (24-26)$$

これらは反射率のみによる考察であるが、放射率の影響の強い中間赤外のチャンネルと反射率の影響

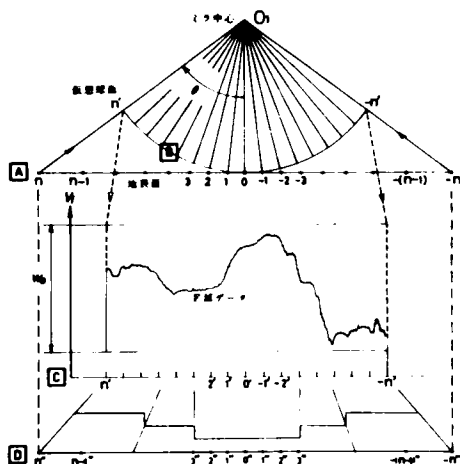


図 24-6 地表面と FM データの対応関係

響の強いチャンネルにおいても両者 $N(\lambda)$ の差を用いれば、パスラジアンスを除去することができる。

つぎに、上述のチャンネル演算以外にチャンネルデータを線形結合させ主成分を求め、この主成分によって地物の分類や特性を調べることも考えられる。^{2,35)}そこで、従来すでに発表されているチャンネル演算式の一部を調べたところ下記の式などがある。^{2,36)}

$$\left. \begin{aligned} S_{CH} &= S_i / \sum S_j, & S_{CH} &= S_i / S_j \\ S_{CH} &= (S_i - \sum S_j) / (S_i + \sum S_j) \\ S_{CH} &= (S_i - S_j) / (S_i + S_j) \\ S_{CH} &= \sum a_i S_i, & S_{CH} &= \sum a_i S_i / \sum b_j S_j \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24-27)$$

ここに、 S_i とはチャンネル i のデータ、 S_{CH} はチャンネル演算した結果を意味する。そこで、これらのチャンネル演算式を考察し、下記に示すチャンネル演算用の一般式を作成してみた。^{2,37)}

$$S_{CH} = a_1 \sum b_{1i} S_i / a_2 \sum b_{2i} S_i + a_3 \sum b_{3i} S_i / a_4 \sum b_{4i} S_i \dots\dots\dots (24-28)$$

上式は式(24-24)から式(24-27)のすべてを表わすことができる。しかし、係数が多いため煩雑となる。この欠点はアルゴリズム上で解消させた。このアルゴリズムを用いて第5章のトレーニング地区の選定用図面を作成することにする。

なお、上記のチャンネル演算式(24-28)はソフト処理を年頭において作成したものであるが、^{2,38)}ハード的に処理する方法もある。たとえば、地球資源相互の処理システム^{2,38)}やカラーディスプレイ装置などがあり、これらを用いればマンマシンシステムによって目的のパターンや地物を抽出するための多くの実験ができる。^{2,39)}ただし、ハード的制限を常に受けるので、利用制限を調べておくことが肝要である。

2.5 結 語

リモートセンシング手法による地物調査による地物判定にMSSのデータを用いることから、リモートセンシングの一般論として衛星と航空機調査の相違と用途を主に述べ、MSS以外のセンサーについても紹介してきた。ここで限定された航空機によるMSS調査では、MSSデータの値の物理的性質を明示し一貫性を持たせる意味で、Planckの黒体放射の法則、Boltzmannの理論を用いてセンサー入力放射輝度を地物の放射・反射率などで関連づけ、センサー入力後のチャンネルデータとMSSのフィルム透過率の関係を示した。これらのことは部分的に多くの研究者によって発表されてきているが、一貫性を持たせたところに意味があると考えている。この結果、第4、5章のMSS画像とデータの物理的性質を明示できると思っている。

また、本章の式(24-19)、(24-20)はグランド・ウルースデータが存在するときに実用的で

あり、係数 $\alpha_1(\lambda)$ の変動を分析することによって、地物のパターン内のバラツキ状態を調べることができる。また、地物のパターン内が一様と考えられるときには大気による影響やMSSの雑音などを分析することができる。

つぎに、チャンネル演算式は地物調査をして地物判定するためのもので、その一般式を提案した。これは天空光などを無視できる場合である。この式は汎用性があるのでプログラムを作成することにした。これを用いて第5章のパスラジアンズ除去のグレーマップやチャンネル和のグレーマップに適用したところ、実用的であったので地物判定以外の研究にも応用できよう。

参 考 文 献

- 2.1) S. G. Luther : 'Snow Cover Monitoring by Machine Processing of Multitemporal LANDSAT MSS Data', NASAec Publ [SP391], 1975, p.279 ~ 294.
- 2.2) H. H. Schumann, 'Operational Applications of Satellite Snowcover Observations and LANDSAT Data Collection Systems Operations in Central ARIZONA', NASAec Publ [SP391], 1975, p.279 ~ 294.
- 2.3) J. R. Eagleman, F. T. Ulaby : 'Remote Sensing of Soil Moisture by Skylab Radiometer and Scatterometer Sensors', J. of Astronautical Sciences, Vol. XX111, No.2, 1975.4-6, p.147 ~ 159.
- 2.4) 落合弘明 : "リモートセンシングによる海洋情報," 計測と制御, Vol. 15, No.7, 1976, p.593 ~ 599.
- 2.5) P. G. Mott, H. J. Chismon : 'The Use of Satellite Imagery for Very Small Scale Mapping', Photogrammetric Record, Vol. 46, No.8, 1975, p.458 ~ 475.
- 2.6) LARS : 'Remote Multispectral Sensing in Agriculture', LARS Rep. Vol.8, No.844, 1968.9, p.3 ~ 63.
- 2.7) たとえば, Proceedings of the 1-10th International Symposium of Environment.
- 2.8) 科学技術庁資源調査所 ; "リモートセンシング情報利用技術の開発に関する調査研究報告," 科学技術庁資源調査資料第40号, 1976.3, p.8 ~ 11.
- 2.9) S. A. Hempenius (青木訳) : 'Infrared Thermography at the ITC', J. J. S. P. Vol.14, No. 2, 1975, p.34 ~ 46.
- 2.10) K. W. Wong : 'Geometric and Cartographic Accuracy of ERTS-1 Imagery',

Photogrammetric Engineering, Vol.41, No.5, 1975.5, p.621 ~ 635.

- 2.11) R. M. Hoffer ; 'Computer- Aided Analysis of Skylab Scanner Data for Land Use Mapping, Forestry and Water Resource Applications', NASA9- 13380, 1975, p.935 ~ 941.
- 2.12) D. Meissner, B. Kunkel ; 'The Role of Spacelab in the Long Term Programme Planning for an Earth Observation System', J. of British Interplanetary Society, Vol. 24, 1975, p.592 ~ 607.
- 2.13) リモートセンシング技術センター ; “人工衛星によるリモート・センシングの状況について,” 1976. 5.
- 2.14) G. Konecny ; 'Mathematische Modelle und Verfahren zur Geometrischen Auswertung von Zeilenabtaster- Aufnahmen', BuL, 1976. 5, S.188 ~ 197.
- 2.15) M. F. Baumgardner ; 'Effects of Organic Matter on the Multispectral Properties of Soils', Purdue Univ. Note. 030570, 1969, p.1 ~ 8.
- 2.16) 星 仰 ; “農業におけるリモートセンシングの基礎調査〔Ⅰ〕,” 公害と対策, Vol.10, No.6, 1974. 6, p.69 ~ 76.
- 2.17) 星 仰 ; “農業におけるリモートセンシングの基礎調査〔Ⅱ〕,” 公害と対策, Vol.10, No.8, 1974. 8, p.69 ~ 73.
- 2.18) 前出 2.6) p.48 ~ 53.
- 2.19) 長瀬産業 (株) ; “コダック社製品資料,” 1971.
- 2.20) 安田嘉純 (他) ; “カラー写真画像の補正,” 計測自動制御学会リモートセンシングシンポジウム資料, 1975, 11, p.51 ~ 54.
- 2.21) R. H. Gelnett ; 'Airborne Remote Sensors Applied to Engineering Geology and Civil Works Design Investigations', Motorola A. R. S., TR- 17621, 1975. 12, p.1 ~ 10.
- 2.22) R. K. Moore ; 'Radar and Microwave Radiometry', International Workshop on Earth Resources Survey Systems, NASA, 1971. 5, p.287 ~ 292.
- 2.23) A. Kozma, R. W. Larson ; 'Application of SAR to Remote Sensing', 1976. p.1 ~ 27.
- 2.24) J. W. Roessel ; 'SLAR Mosaics for Project RADAN', Photogrammetric Engineering, Vol. 40, No.5, 1974.5, p.583 ~ 595.

- 2.25) L. C. Graham ; 'Flight Planning for Stereo Radar Mapping', Photogrammetric Engineering, Vol. 41, No.9, 1975. 9, p. 1131 ~ 1138.
- 2.26) 渡辺比佐雄 : “空中写真によるパターン测温について,” 写真測量, Vol.11, No.4, 1972, p.28 ~ 32.
- 2.27) 豊田弘道 ; “熱赤外面像解析の基礎,” 日本国土海洋総合学術診断事業報告書, Rep. 750047, 1955. 10, p.338 ~ 347.
- 2.28) C. E. A. R. N.[ect]; 'Agricultural Resources Investigations in Southern France and Northern Italy', Pro. of 9 I. S. on Remote Sensing of Environment, Vol.2, 1974, p.1156 ~ 1157.
- 2.29) Y. Yasuda, Y. Emori ; 'Computer Recognition of Aerial Multispectral Photography using Optical Density of Object', Pro. of 9 I. S. R. S. E. Vol.2, 1974, p.91 ~ 102.
- 2.30) 上野秀夫, 向井苑生 ; “地球衛星による大気・海洋系の反射像の解析,” 計測自動制御学会リモートセンシングシンポジウム資料, 1975. 11, p.85 ~ 88.
- 2.31) 寺下陽一 ; “リモートセンシングデータにおける大気散乱光,” 計測自動制御学会リモートセンシングシンポジウム資料, 1975. 11, p.43 ~ 46.
- 2.32) F. Quiel ; 'Zur Vorverarbeitung multispektraler Daten', BuL, 44. Jahrgang, No.1, 1976, S.42 ~ 44.
- 2.33) 星 仰 ; “航空機による熱線画像の基礎理論と画像判読,” 和歌山工業高等専門研究紀要, No.11, 1974. 12, p.60 ~ 66.
- 2.34) 星 仰 ; “農業におけるリモートセンシングの基礎調査〔Ⅳ〕,” 公害と対策, Vol.10, No.10, 1974. 10, p.77 ~ 83.
- 2.35) 村井俊治(他) ; “LANDSAT画像データの主成分分析による水環境解析,” 日本写真測量学会年次学術講演会発表論文集, 1976. 5, p.42 ~ 45.
- 2.36) 飯坂譲二(他) ; “MSSの有効チャンネルの選択,” 計測自動制御学会リモートセンシングシンポジウム資料, 1975. 11, p.57 ~ 60.
- 2.37) 星 仰 ; “航空機によるMSSデータのチャンネル演算処理,” 土木学会関西支部年次学術講演概要集, 1977. 4, p.Ⅳ24-1 ~ 2.
- 2.38) M. R. Felix ; 'Earth Resources Interactive Processing System', IBM Rep. H74 - 0010-R, 1972, p.1 ~ 80.
- 2.39) 星 仰, 飯坂譲二 ; “チャンネル演算によるMSSデータの視覚的表示の効果,” 日本写真測量学会年次学術講演会発表論文集, 1976. 5, p.34 ~ 37.

第3章 航空機によるMSSの幾何学的性質

3.1 概 説

従来の中心投影による解析理論は内部標定要素が製作時に精密測定されている場合と内部標定要素が未知の場合の2分野に区分でき、内部標定が既知の場合の外部標定要素の決定方法に関する理論はO. Gruber^{3.1)}などによって研究されてきている。一方、内部標定要素が未知な場合で外部標定要素と同時に解析する理論はA. D. N. Smith^{3.2)}やE. L. Merritt^{3.3)}などによって究明されてきている。

これらの写真測量の標定理論を基礎にして1966年頃からG. Konecny^{3.4)3.5)}らによってMSS画像の位置の歪を修正する理論(ここでは以下偏位修正理論と呼ぶことにする)が提唱されてきている。

この理論によればスキャナから抽出されたアナログ信号をFMテープに保管するのを画像面に直接投影したと想定し、MSSの走査線ごとの画像位置と対地座標とを関係づけている。この方法はMSSの偏位修正に応用するにはハード的に問題があり、画像の厳密な標定は困難であるが、偏位要素の挙動を知る上で重要であると考えられる。また、この方法は画像全体の偏位修正を行なう近似的方法として適用できるものと思われる。

これらのことから^{3.6)}第3章3節ではG. Konecnyの理論に基づいた近似的偏位修正理論を述べ、この理論を用いて偏位修正要素の挙動を対地高度、地表の起伏要因などを考慮しつつ調べる。この結果を用いて偏位修正要素の変動に対する位置のずれ量を算出し、今後の飛行計画への考慮を行ない、G. Konecny理論を発展させるためのMSS画像作成用器材へのハード的提案を結論で述べる。

また、偏位修正理論を述べるに当たり、MSSの機構を知る必要があるので第2章で論述した放射輝度がMSSに入射してからの光学的経路の実例とMSSの検出素子の応答曲線を示し、MSS画像やCCTの作成順序の概要を述べる。

3.2 MSSの機構

本節は第4章においてFMテープより作成されたMSS画像を使用し、第5章においては計算機用テープに保管されたデータを使用するので、これらの情報伝達経路の概略を示すものである。

3.2.1 MSSの検出素子と応答曲線

太陽光線による地物の反射・放射エネルギーをセンサーが捕えた以後の光学的経路は主鏡、副鏡など複数の反射鏡を経て各波長帯に適した検出器に達する。図3.2-1は国産のMSSの光学

3.7)
経路を示した一例である。

検出素子は波長帯によってその応答特性が異なるため、MSSの検出素子の開発と応答特性の
関係に関する研究が進められてきた。図3 2-2は検出素子の応答曲線を示した一例であるが、^{3.8)3.9)}
この応答曲線の応答強度 D_λ でデータを抽出すれば、MSSの検出素子として最適である。これら

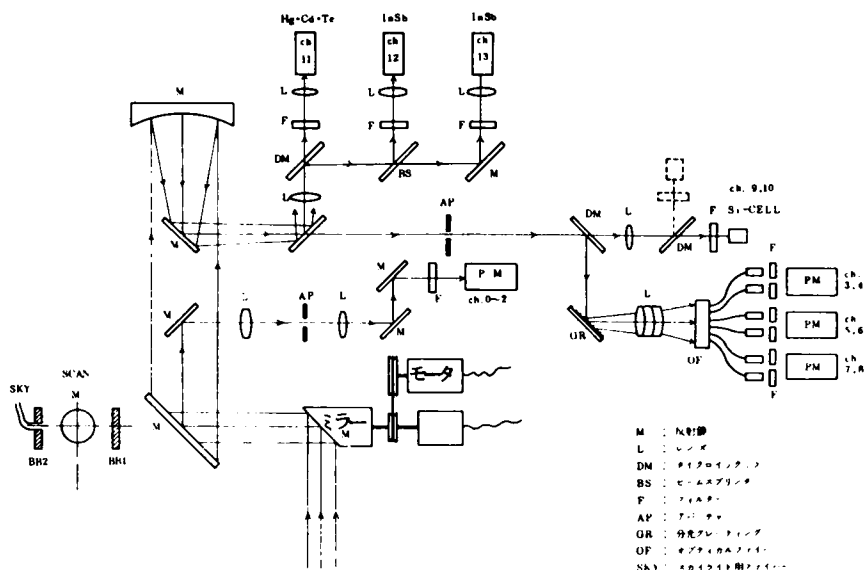


図3 2-1 ジルコスキナの光学経路

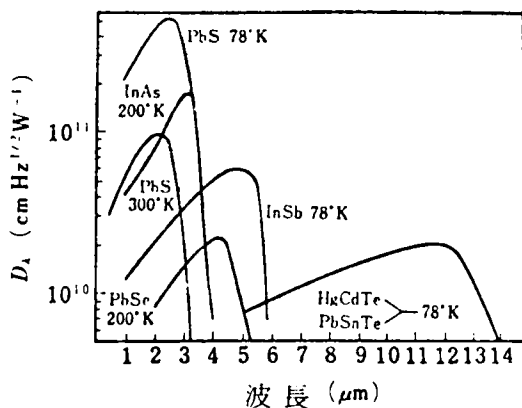


図3 2-2 各種検出素子の応答曲線

のことを考慮に入れ、最近では紫外・可視光域に光電子増倍管を、熱赤外光域には半導体検出器
を使用している。

この検出器の設計には上述の応答分光感度の他に雑音、応答速度が加味される。

このほか、波長区分については人工衛星に塔積された検出器の感知波長帯と航空機のそれとが対比できるよう考慮されている。

3.2.2 MSSデータの情報の流れ

検出器より出力される信号電圧は各チャンネル情報として広幅テープレコーダーによってアナログテープに記録される。このアナログテープはFMテープと呼ばれている。FMテープレコーダーの代用として一般科学実験用のデータレコーダーを用いた例もあるが、以後のデータ処理装置の関連性から考察すると、試作処理装置が必要になってくると思われる。

このFMテープの情報伝達方法は、地上に送信する方法、機上でデジタル変換する方法、さらにはFMテープを地上ステーションに持ち帰りデータ処理する方法などがある。前2者は送信・受信装置の設備を要し、機上塔積重量など種々の問題を含んでいるため、後者の方法が経済的であり、航空機による調査に適用されている。この方法による情報の流れの概要を図32-3に示す。FMテープ(FMT)をデジタル解析用とすると、FMTから取り出されるアナログ波形を一定時間間隔でサンプリングし、AD変換を行ないデジタル量としてデータを磁気テープ(MT)に保管する。このMTをCCT(Computer Compatible Tape)という。CCTのデータ構成はMSS器材とその周辺装置によって異なるが通常ワン・ブロックにヘッダー、以後のブロックにフライトデータとラインデータが格納されている。

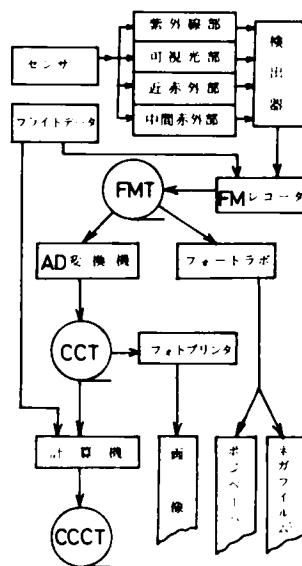


図32-3 MSSデータの流れの概要

わが国のMSS航空調査の多くの実施例では、ラインデータの画素数は802と714である。前者のフォーマットは表32-1と図32-4に示してある。^{3.10)}

この形式によるCCTのデータに各種の補正を行なったデータを保管した磁気テープがCCCT(Corrected CCT)である。

このCCCTは第5章の実験で使用するの、このフォーマットを、表32-2に示しておく。なお、CCTからCCCTを作成するための補正条件についての説明は5・2で述べる。

つぎにFMテープのアナログ利用については、多くの場合画像化による視覚判読が利用の主用途である。画像化の方法にはフォトラボを通してポジペーパー、ネガフィルムにする場合、CCTからフォトプリンタなどを通して写真にする場合、クイックルッカー装置で画像化する場合など

平面Ⅰは座標系(X, Y, Z)の $X-Y$ 平面であり、(X, Y, Z)座標系の原点 O ((x, y, z)系の原点と一致している)より $Z = -h$ (投影距離)にあるものとする。このように考えると、写真像 p (x, y)とその投影点 P (X, Y, Z)とは中心投影の原理により次式のような関係にあることが容易にわかる。

$$X = (x/c)h, \quad Y = (y/c)h$$

$$\dots\dots\dots (33-1)$$

以後、式(33-1)で表わされる投影点座標を最初的位置という意味を持たせるために(X_0, Y_0)を使用して表わすことにする。

つぎに、(x, y, z)座標系が(X, Y, Z)座標系に対して回転した状態を想定してみる。回転要素としては、 ω, ϕ, κ をそれぞれ X, Y, Z 軸のまわりの回転とし、回転方向は左手座標系(X, Y, Z)で各座標軸の正方向を図33-1の矢印の方向とする。また、回転の順序は ϕ, ω, κ の順とし、座標軸そのものが回転していくものとする。

回転後の写真像 p の(X, Y, Z)座標系での位置(X_p, Y_p, Z_p)は周知のごとく次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} = D_\phi D_\omega D_\kappa \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$\dots\dots\dots (33-2)$$

ここに、 $D_\phi, D_\omega, D_\kappa$ は次式で与えられる回転行列である。

$$D_\phi = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix}, D_\omega = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix}, D_\kappa = \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\dots\dots\dots (33-3)$$

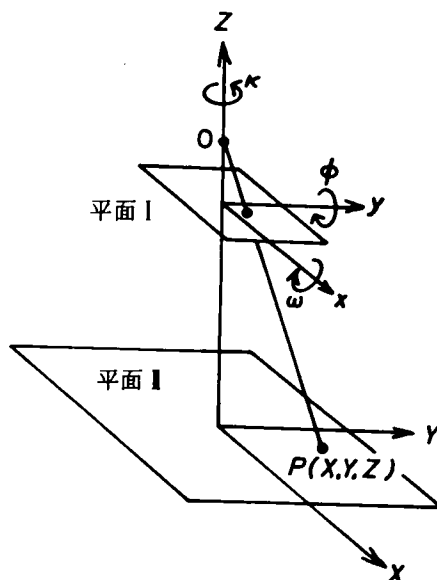


図33-1 中心投影モデル

式(33-2)を考察すると回転後の投影点座標 $P(X, Y, Z)$ は簡単に計算でき式(33-4)となる。

$$X = \frac{X_p}{Z_p} h = \frac{h\{x(\cos\varphi \cos\kappa + \sin\varphi \sin\omega \sin\kappa) + y(-\cos\varphi \sin\kappa + \sin\varphi \sin\omega \cos\kappa) + c \sin\varphi \cos\omega\}}{x(\sin\varphi \cos\kappa - \cos\varphi \sin\omega \sin\kappa) + y(-\cos\varphi \sin\omega \cos\kappa - \sin\varphi \sin\omega) + c \cos\varphi \cos\omega}$$

$$Y = \frac{Y_p}{Z_p} h = \frac{h\{x \cos\omega \sin\kappa + y \cos\omega \cos\kappa - c \sin\omega\}}{x(\sin\varphi \cos\kappa - \cos\varphi \sin\omega \sin\kappa) + y(-\cos\varphi \sin\omega \cos\kappa - \sin\varphi \sin\omega) + c \cos\varphi \cos\omega} \quad \dots\dots\dots (33-4)$$

いま、回転要素として微小量 $d\varphi, d\omega, d\kappa$ を与えたとき、式(33-4)で与えられる投影点座標と回転要素がすべて零のときの投影点座標(式(33-1))との差を

$$\Delta X = X - X_0, \quad \Delta Y = Y - Y_0 \quad \dots\dots\dots (33-5)$$

と書くと、回転要素が微小であるときは式(33-6)、式(33-7)のように $\Delta X, \Delta Y$ 、を近似して書き表わせる。^{3.11)}

$$\Delta X = -(h/c)y d\kappa + h\{1 + (x/c)^2\}d\varphi - (h/c^2)xy d\omega \quad \dots\dots\dots (33-6)$$

$$\Delta Y = -(h/c)x d\kappa + (h/c^2)xy d\varphi - h\{1 + (y/c)^2\}d\omega \quad \dots\dots\dots (33-7)$$

さらに、上式を投影点座標で書き表わすと、式(33-8)となる。^{3.12) 3.13)}

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= -Y d\kappa + h\{1 + (X/h)^2\}d\varphi - (XY/h)d\omega \\ \Delta Y &= X d\kappa + (XY/h)d\varphi - h\{1 + (Y/h)^2\}d\omega \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (33-8)$$

これらの関係はMSSの偏位修正を実施する場合に重要なものである。

(2) MSSの偏位修正の基礎関係式

MSSの走査鏡は飛行方向の軸のまわりに回転する機構のため地表を飛行方向と直角な帯状に走査することになる。このため上述の中心投影モデルの関係式はMSS画像では各走査線についてのみ成り立つことになる。図33-2は図33-1における原点に走査鏡をおき、平面Ⅱに地表面に対応させたものである。図33-3の円弧は走査角の値を一定に増加させながらデータを抽出した場合を想定したもので、弧長を ν' で表わすことにする。また、図33-3の ν はストリップ写真の1スリットに対応するもので、これを仮想陽画面と呼ぶことにする。いま、 c を仮想陽画面の画面距離とすれば式(33-9)の関係

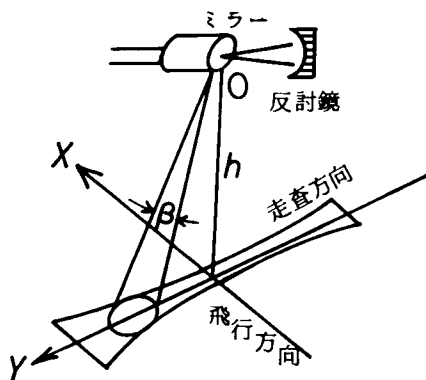


図33-2

が成立つ。

$$y' = c \theta, \quad y = c \tan \theta, \quad Y = h \tan \theta$$

$$\dots\dots\dots (33-9)$$

式(33-9)を式(33-8)に代入し、 $X=0$ とおくと、MSSの走査線上の関係式を得る。

$$\Delta X = -h \tan \theta d\kappa + h d\varphi, \quad \Delta Y = -h(1 + \tan^2 \theta) d\omega$$

$$\dots\dots\dots (33-10)$$

回転中心の平行移動量を db_x, db_y, db_z 、とする
とこの影響による $\Delta X, \Delta Y$ の移動量は式(33-11)となる。

$$\Delta X = (h/c) db_x, \quad \Delta Y = (h/c) db_y + (h/c) \tan \theta \cdot db_z \quad \dots\dots\dots (33-11)$$

回転量 $d\varphi, d\omega, d\kappa$ と平行移動量 db_x, db_y, db_z の影響を総合して $\Delta X, \Delta Y$ を求めると式(33-10), (33-11)から式(33-12)となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= -h \tan \theta \cdot d\kappa + h d\varphi + (h/c) db_x \\ \Delta Y &= -h(1 + \tan^2 \theta) d\omega + (h/c) db_y + (h/c) \tan \theta db_z \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (33-12)$$

上式の $\tan \theta$ をテーラ展開して第3項まで採用し、さらに θ の5次以上を省略すると式(33-13)となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= -h \left(\theta + \frac{1}{3} \theta^3 \right) d\kappa + h d\varphi + (h/c) db_x \\ \Delta Y &= -h \left(1 + \theta^2 + \frac{2}{3} \theta^4 \right) d\omega + (h/c) db_y + (h/c) \left(\theta + \frac{\theta^3}{3} \right) db_z \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (33-13)$$

さらに、比高 Δh を考慮すると式(33-13)はさらに発展して式(33-14)となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= -(h - \Delta h) \left(\theta + \frac{\theta^3}{3} \right) d\kappa + (h - \Delta h) d\varphi + \frac{h - \Delta h}{c} db_x \\ \Delta Y &= -(h - \Delta h) \left(1 + \theta^2 + \frac{2}{3} \theta^4 \right) d\omega + \frac{h - \Delta h}{c} db_y + \frac{h - \Delta h}{c} \left(\theta + \frac{\theta^3}{3} \right) db_z \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (33-14)$$

また、式(33-9)から $\theta = y'/c$ を式(33-14)に適用すると次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= -(h - \Delta h) \left\{ \frac{y'}{c} + \frac{1}{3} \left(\frac{y'}{c} \right)^3 \right\} d\kappa + (h - \Delta h) d\varphi + \frac{h - \Delta h}{c} db_x \\ \Delta Y &= -(h - \Delta h) \left\{ 1 + \left(\frac{y'}{c} \right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{y'}{c} \right)^4 \right\} d\omega + \frac{h - \Delta h}{c} db_y + \frac{h - \Delta h}{c} db_z \\ &\quad + \frac{h - \Delta h}{c} \left\{ \left(\frac{y'}{c} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{y'}{c} \right)^3 \right\} db_z \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (33-15)$$

ところで、スキャナの偏位修正要素はランダム変動をすれば、これらをフーリエ級数で仮定することができ、式(33-16)の関係が成立つことになる。^{3.14)}

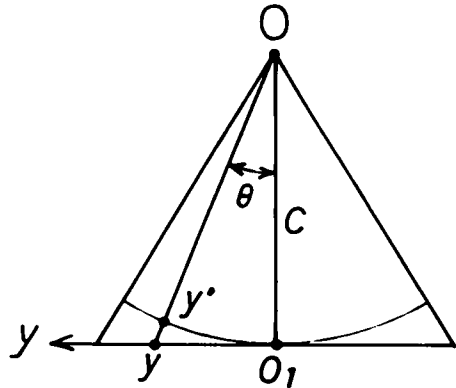


図 33-3

$$\left. \begin{aligned} b_x &= a_{0x} + \sum_{k=1}^m (a_{kx} \cos kt + b_{kx} \sin kt), & b_y &= a_{0y} + \sum_{k=1}^m (a_{ky} \cos kt + b_{ky} \sin kt) \\ b_z &= a_{0z} + \sum_{k=1}^m (a_{kz} \cos kt + b_{kz} \sin kt), & d\varphi &= a_{0\varphi} + \sum_{k=1}^m (a_{k\varphi} \cos kt + b_{k\varphi} \sin kt) \\ d\omega &= a_{0\omega} + \sum_{k=1}^m (a_{k\omega} \cos kt + b_{k\omega} \sin kt), & d\kappa &= a_{0\kappa} + \sum_{k=1}^m (a_{k\kappa} \cos kt + b_{k\kappa} \sin kt) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (33-16)$$

ここで $m=1$ で近似し飛行時間 t は飛行距離に比例することから、仮想陽画面の x 座標を x' に置き換えて、 $\sin, \cos t$ をテーラ展開して第2項まで採用すると $\Delta X, \Delta Y$ は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= -(h-\Delta h) \left\{ \left(\frac{y'}{c}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{y'}{c}\right)^3 \right\} \{ a_{0x} + a_{1x} x' + a_{2x} (x')^2 + a_{3x} (x')^3 \} \\ &\quad + (h-\Delta h) \{ a_{0\varphi} + a_{1\varphi} x' + a_{2\varphi} (x')^2 + a_{3\varphi} (x')^3 \} \\ &\quad + \frac{h-\Delta h}{c} \{ a_{0z} + a_{1z} x' + a_{2z} (x')^2 + a_{3z} (x')^3 \} \\ \Delta Y &= -(h-\Delta h) \left\{ 1 + \left(\frac{y'}{c}\right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{y'}{c}\right)^3 \right\} \{ a_{0\omega} + a_{1\omega} x' + a_{2\omega} (x')^2 + a_{3\omega} (x')^3 \} \\ &\quad + \frac{h-\Delta h}{c} \{ a_{0y} + a_{1y} x' + a_{2y} (x')^2 + a_{3y} (x')^3 \} \\ &\quad + \frac{h-\Delta h}{c} \left\{ \left(\frac{y'}{c}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{y'}{c}\right)^3 \right\} \{ a_{0s} + a_{1s} x' + a_{2s} (x')^2 + a_{3s} (x')^3 \} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (33-17)$$

上式は Konecny の2次式をさらに3次まで採用したにすぎない。^{3.15)}

ここで、式(33-17)をつぎのように書き改めると、

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_i &= b_{1i} a_{0x} + b_{2i} a_{1x} + b_{3i} a_{2x} + b_{4i} a_{3x} \\ &\quad + b_{5i} a_{0\varphi} + b_{6i} a_{1\varphi} + b_{7i} a_{2\varphi} + b_{8i} a_{3\varphi} \\ &\quad + b_{9i} a_{0z} + b_{10i} a_{1z} + b_{11i} a_{2z} + b_{12i} a_{3z} \\ \Delta Y_i &= e_{1i} a_{0\omega} + e_{2i} a_{1\omega} + e_{3i} a_{2\omega} + e_{4i} a_{3\omega} \\ &\quad + e_{5i} a_{0y} + e_{6i} a_{1y} + e_{7i} a_{2y} + e_{8i} a_{3y} \\ &\quad + e_{9i} a_{0s} + e_{10i} a_{1s} + e_{11i} a_{2s} + e_{12i} a_{3s} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (33-18)$$

上式を解くには24個の未知係数を決定する必要がある。MSSによって抽出された地表物体の放射・反射強度波形をそのまま再生するとすれば、図33-4(a)の地形格子が(b)図のごとく両端の歪んだ画像となる。この歪補正をするために対地座標点 (X, Y, Z) を地図上で抽出してMSSの走査方向の応答値を直線的に濃度レベルで表現し、走査線を連続的にフィルム上に焼きつけたMSS走査画像があると仮定するなら、この画像から地図上に対応する位置 (x'_i, y'_i) と地図座標 (X_i, Y_i) の関係は式(33-19)となる。

$$\Delta X_k = X_k - x'_i (h/c), \quad \Delta Y_k = Y_k - h \tan(\psi'_c/c) \quad \dots\dots\dots (33-19)$$

基準点について式(33-18)を組立て、係数を決定する場合、 $i = 24$ のとき係数は一義的に決定され、 $i > 24$ なら最小二乗法を適用することになる。

ところで、 $i \gg 24$ の場合、記憶容量を多く必要とし、行列計算に長時間を要することになる。これらの難点を解決するために、未知係数間の相関係数を求め係数を減少させる手法も考えられる。

この手法によれば、まず式(33-20)で表わされる正規方程式の係数のつくる行列の逆行列を求め、それらを Q とする。

$$[\zeta_i \zeta_1] a_{0\omega} + [\zeta_i \zeta_2] a_{1\omega} + \dots\dots + [\zeta_i \zeta_{24}] a_{3z} = [\zeta_i l] \quad \dots\dots\dots (33-20)$$

ただし、 $i = 1, 2, \dots\dots, 24$ 。

$$Q = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots\dots & Q_{1k} \\ Q_{21} & Q_{22} & & \\ \vdots & & & \\ Q_{k1} & & & Q_{kk} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (33-21)$$

この Q_{ij} より係数 $a_{0\omega} \sim a_{3z}$ 間の相関係数 r_{ij} が式(33-22)から定められる。^{3.16)}たとえば、この相関係数が1に近いものは未知係数間の影響力が同程度と考え、未知係数の一部を省略することができる。^{3.17)}

$$r_{ij} = Q_{ij} / \sqrt{Q_{ij} Q_{ij}} \quad \dots\dots\dots (33-22)$$

以上に述べた手法によって $\Delta X_i, \Delta Y_i$ が計算できるとき、これらを利用してMSS画像の修正を実施することができる。このときに使用する式は外部標定要素による偏位量と比高の影響による量から下記の関係となる。ただし、式(33-23)は、MSS画像に \tan 補正がなされているときであり、式(33-24)はMSS画像に \tan 補正がなされていない場合である。

$$\bar{x}_i = (c/h) \Delta X_i, \quad \bar{y}_i = (c/h) \Delta Y_i + \{(h - \Delta h)/h\} \psi'_i \quad \dots\dots\dots (33-23)$$

$$x_i = (c/h) \Delta X_i + x'_i, \quad y_i = (c/h) \Delta Y_i + \{c(h - \Delta h)/h\} \tan(\psi'_c/c) \quad \dots\dots (33-24)$$

以上の関係式からMSSの走査陽画像があれば、地図の座標位置から偏位修正が可能となる。

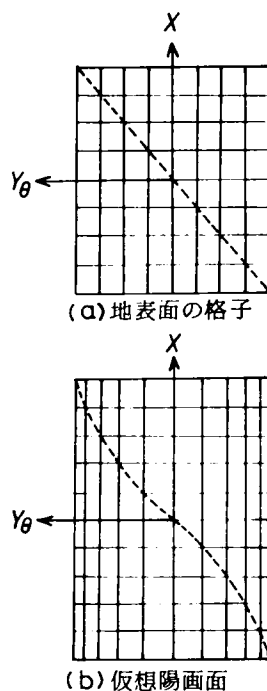


図33-4 MSSの走査方向の歪状態

この偏位修正を実行するに当り、多数の観測値がばらついた値として得られたとき、これらは偶然誤差のような現われ方をすると思われるが、その観測値を詳しく分析すれば、系統的誤差として補正しなければならない部分が存在することが多い。このようなことは、精密な結果を得たいときは注意すべきである。^{3.18)} MSS データを利用する場合でも、上記の事項以外に位置補正量として考慮しなければならない事項が考えられる。しかし、本研究の場合には厳密な位置補正を行っていないので、ここで示した補正要素を考えておけば十分である。

なお、上述の Konecny 理論を適用する必要のない簡略な方法として、アフィン変換による方法などが提案されているが、^{3.19)} ここでは省略する。

3.4 MSS の偏位修正要素の挙動

MSS の偏位修正は前節 3.3 で述べた方法により、偏位修正要素 $d\omega, d\varphi, d\kappa, db_x, db_y, db_z$ を決定すれば行なえることが明らかとなった。この各偏位修正要素の変動が、対地座標 X, Y にどの程度影響を及ぼすかを具体的な実験値によって挙動を調べ、MSS 調査のオーバーラップの程度を決定するのに役立てる。

(1) ω の影響

$$\Delta X_{\omega} = 0, \quad \Delta Y = -h\{1 + \theta^2 + 2\theta^4/3\}d\omega \quad \cdots \cdots \cdots (34-1)$$

この関係式において $0 \leq \theta \leq 40^\circ$ の範囲での $h = 500, 1000, 1500, 2000, 2500$ における $\omega = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ と変化させたときの式 (34-1) の関係を図示すると図 34-1 となる。

(2) φ の影響

式 (33-12) から $\Delta X, \Delta Y$ の φ に影響する項を求めるとつぎの通りである。

$$\Delta X_{\varphi} = h d\varphi, \quad \Delta Y_{\varphi} = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (34-2)$$

$h = 500 \sim 2500$ における $d\varphi$ と ΔX_{φ} を図示すると図 34-2 となる。

(3) κ の影響

Z 軸の回転量 $d\kappa$ のみを与えたときの $\Delta X_{\kappa}, \Delta Y_{\kappa}$ は式 (33-12) から式 (34-3) となる。

$$\Delta X_{\kappa} = -h(\theta + \theta^3/3)d\kappa, \quad \Delta Y_{\kappa} = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (34-3)$$

$0 \leq \theta \leq 40^\circ$ の範囲における $h = 500 \sim 2500_m$ での $d\kappa$ と ΔX_{κ} の関係を図示すると図 34-3 となる。

(4) b_x による影響

飛行方向 X における微小移動量 db_x を生じたときの対地座標のずれ量 $\Delta X_x, \Delta Y_x$ は式 (33-12) から式 (33-4) となる。

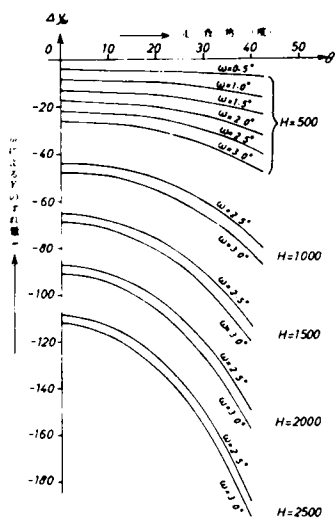


図 34-1 ω の影響

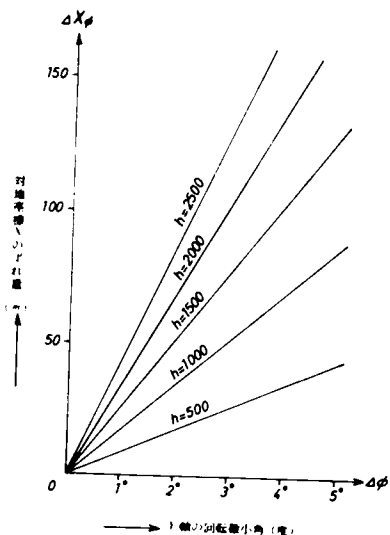


図 34-2 ϕ の影響

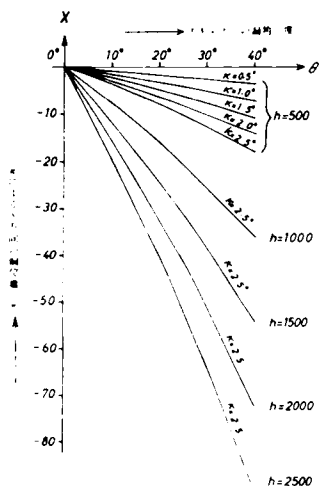


図 34-3 κ の影響

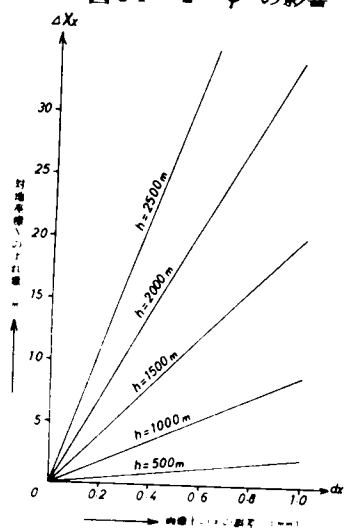


図 34-4 b_x の影響

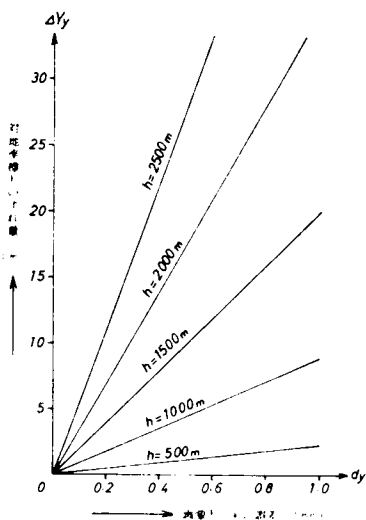


図 34-5 b_y の影響

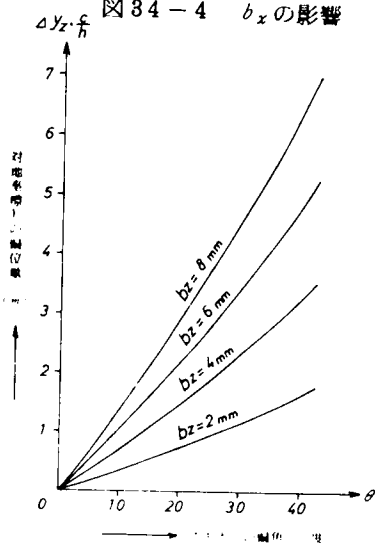


図 34-6 b_z の影響

$$\Delta X_x = (h/c)db_x \quad , \quad \Delta Y_x = 0 \quad \dots\dots\dots (34-4)$$

$c = 75mm$ と仮定したときの各飛行高度における db_x と ΔX_x の関係を図 34-4 に示す。

(5) b_y による影響

仮想陽画面 y の微小変動量 db_y による地表座標の影響を求めると式 (34-5) となる。

$$\Delta X_y = 0 \quad , \quad \Delta Y_y = (h/c)db_y \quad \dots\dots\dots (34-5)$$

これらの関係を示したものが図 34-5 である。

(6) b_z による影響

式 (33-12) において対地座標 X, Y の db_z の影響項は次式となる。

$$\Delta X_z = 0 \quad , \quad \Delta Y_z = (\theta + \theta^3/3)db_z \quad \dots\dots\dots (34-6)$$

この関係を示したものが図 34-6 である。

ここで従来の写真測量の撮影状態を考慮しながら走査方向の欠損率と有効走査幅、オーバーラップなどについて次節で検討してみる。

3.5 考 察

3.5.1 偏位修正量とその適用への考察

偏位修正を行なうためには各走査線ごとに修正量を適用しなければならないため、現実には MSS 画像を作成するには、これに対応するハードウェアが必要である。しかし、現行の MSS 画像再生機は露光光源が直線的にしか移動せず、しかも露光面のフィルムも飛行速度に比例して一定の速度で送られる機構となっている。このため偏位修正をするには従来使用されてきたアフィン変換用機材もしくは空中写真測量用偏位修正機で近似的に画像を作成する程度といえる。したがって、比高のある地点などの偏位修正には適切な器材が現在ないと思われるので、走査線ごとの補正用画像再生機の開発が必要である。

3.5.2 走査方向への考察

X, Y, Z 座標の微小回転量 $\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa$ は空中写真測量では $\pm 3^\circ$ 程度と考えられるため、この微小回転量を与えた場合での MSS の有効走査幅 Y_W を求めてみる。式 (33-13) においてプラットフォームの位置のずれ量は現行の空中写真撮影用機の場合、対地高度 h の 5~10% 程度であるから、MSS の走査幅 $2W_Y = 1.6h$ で与えられるリモートセンサでは $(h/c)db_y = 0.075h$ 、 $(h/c) \cdot (\theta + \theta^3/3)db_z = 0.06h$ となる。また、 $\Delta\omega = 3^\circ$ 、 $\theta = 40^\circ$ における ΔY_ω は約 $-0.09h$ となる。

式 (33-13) において ΔY が最大になる条件は $d\omega < 0$ のとき、 $db_y > 0$ 、 $db_z > 0$ であるから、 $d\omega = -3^\circ$ 、 $\theta = 40^\circ$ における ΔY は式 (35-1) となる。

$$\Delta Y = -h(1+\theta^2+2\theta^4/3)d\omega + (h/c)db_y + (\theta+\theta^3/3)db_z = 0.226h \quad \dots\dots\dots (35-1)$$

また、有効幅 Y_W 、欠損率 $\bar{\rho}_y$ は下記となる。

$$Y_W = 2(W_Y - \Delta Y), \quad \bar{\rho}_y = 100(\Delta Y/W_Y) \dots\dots\dots (35-2)$$

式(53-1)の ΔY の値から式(35-2)の Y_W 、 $\bar{\rho}_y$ を算出すると $Y_W = 1.148h$ 、 $\bar{\rho}_y = 28.3\%$ となる。また、各対地高度における $W_Y = 0.8h$ での有効走査幅 Y_W は表35-1として与えることができる。

表35-1 $W_Y = 1.6h$ のときの有効走査幅

対地高度 h	有効走査幅 Y_W
500	574
1000	1148
1500	1722
2000	2296
2500	2870
3000	3444
3500	4018
4000	4592
4500	5166
5000	5740

つぎに、比高 h_0 のある場合は上述の関係式において h の代りに $h - \Delta h$ を代入すれば有効走査幅 Y_W 、走査方向欠損率 ρ_y を試算しうる。いま、 $\Delta h/h = 0.1$ とすると、 $Y_W = 1.102h$ 、 $\rho_y = 31.1\%$ となる。

以上のことから、MSS画像の利用に際してはMSSの走査方向の調査幅を全面使用することは標定要素の変動により困難であり、仮に $\Delta h/h = 0.1$ で $W_Y = 0.8h$ の条件では走査計画幅の約30%の欠損率を生じることになるため、有効幅は走査計画幅の約70%となる。

これらのことは今後の山岳地でのMSS調査計画に考慮されるべき事項として重要である。

3.5.3 飛行方向Xへの考察

平地におけるXのずれ量は式(33-13)によって与えられた。 ΔX が最大となる条件として $\theta = 40^\circ$ 、 $d\kappa = 2.5^\circ$ 、 $d\varphi = 3^\circ$ 、 $db_x/c = 0.01$ を与えると $\Delta X = 0.097h$ となり、飛行高度の約1割のずれ量を地上で生じることになる。

いま、理想的な走査をするMSSを想定すると図35-1のごとく走査線 i 、 $i+1$ 、 $i+2$ 、…が飛行直下で接する状態のときである。しかし、上述の試算からも飛行高度に対して9.7%程度のX方向のずれを生じるとすれば欠損部をなくするためにはX方向のオーバーラップを考慮しておかねばならない。オーバーラップの方法をここでは i と $i+1$ の間に走査線を何本挿入して欠損部に対する安全性を高めえるかということを考えてみる。

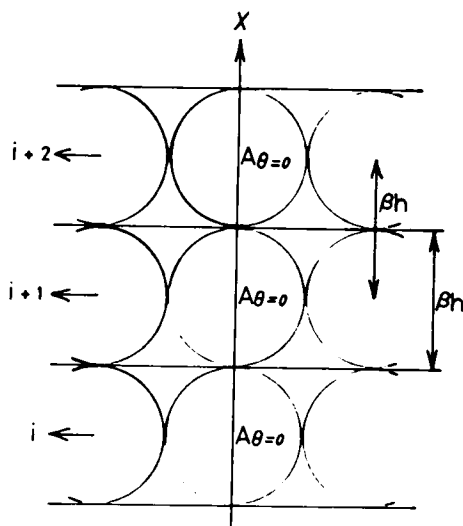


図35-1 飛行直下のオーバーラップのない走査

偏位修正量が零の場合、各走査線間の時間間隔は走査鏡が1回転する時間であるから $t = 1/n_0$ 秒となる。この間に機体は前方に Vt 移動することから

$$V = \beta h n_0 \quad \dots\dots\dots (35-3)$$

が成り立つ時がオーバーラップも欠損部もない境界条件となる。機体が $X = \beta h$ 移動する間に走査鏡が n 回転したと仮定すれば、このときの飛行速度 V_n から

$$V_n = \beta h (n_0 / n) \quad \dots\dots\dots (35-4)$$

が得られる。MSSの調査時には $\beta n_0 =$ 一定であるから、式(35-3)から V/h 比が一定となる。撮影高度を一定に保ったとき、飛行速度を V/n に減速しなければならない。

そこで、 X 方向のずれ量 ΔX を要するための時間を T とすれば、この間に走査鏡は Tn_0 回転したことになるため、欠損部を生じないための条件式としては次式となる。

$$V_n \leq \beta h n_0 - \{ h(\theta + \theta^3/3) d\kappa + h d\varphi + (h/c) db_x \} / T \quad \dots\dots\dots (35-5)$$

上記で定めた $\theta = 40^\circ$, $d\kappa = 2.5^\circ$, $d\varphi = 3^\circ$, $\frac{db_x}{c} = 0.01$ の条件下では式(35-6)となる。

$$V_n \leq \beta h n_0 - 0.097 h / T \quad \dots\dots\dots (35-6)$$

式(35-4), (35-6) から n を求めると、式(35-7)の条件を満足する整数を採用すればよいことになる。

$$n \geq n_0 \beta / (n_0 \beta - 0.097 / T) \quad \dots\dots\dots (35-7)$$

ここに、 $\beta = 2.5 \text{ m rad}$, $n_0 = 80$ とすると式(35-7)の等号が成り立つときの n と T の関係は図35-2となる。

現行の写真測量用航空機では $T = 7.5 \text{ sec}$ 程度を必要とするため $n \geq 1.1$ を満足すれば走査幅の連続によって欠損部を生じないことになる。

つぎに、比高 h_0 のある場合については飛行高度 h が $h - \Delta h$ になることによって瞬時視野角における X 方向の対地幅が $\beta(h - \Delta h)$ となるため $\beta \Delta h$ の欠損部を生じることになる。機上が対地距離 $x = \beta h$ を移動する間での偏位修正要素による欠損率は微小につき省略してもよいので、この条件下での比高 Δh とオーバーラップの度数 n の関係は図35-3となる。

以上のことから、偏位修正要素による対地の欠損部を生じないためには走査鏡の回転数を1割を増しておくこと、比高 h_0 の値から走査鏡の回転数もしくは飛行速度を

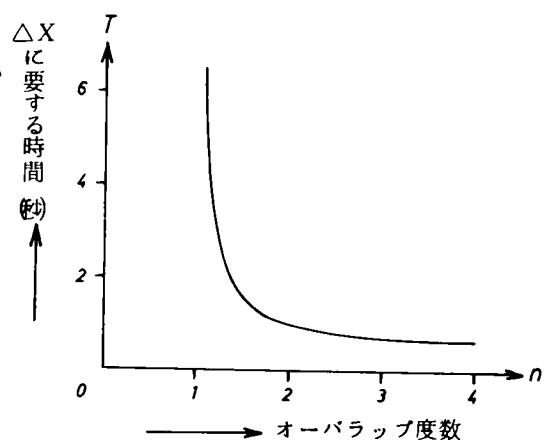


図35-2 ΔX に要する時間とオーバーラップの関係

決定することである。

通常比高 $\Delta h < 0.5h$ と考えてよいから標定要素によるX方向の欠損率を加味しても山岳地で $n = 3$ 、平地部で $n = 2$ を用いて調査計画をすれば充分といえる。^(3.20)

3.6 結 語

本章では、MSS画像を偏位修正するために中心投影理論を発展させ G. Konecnyの偏位修正理論を論述し、偏位修正要素を決定する係数の近似式を示した。この係数を減少することは連立方程式の元数を減らすことになり、この結果、処理時間を短縮できる。この

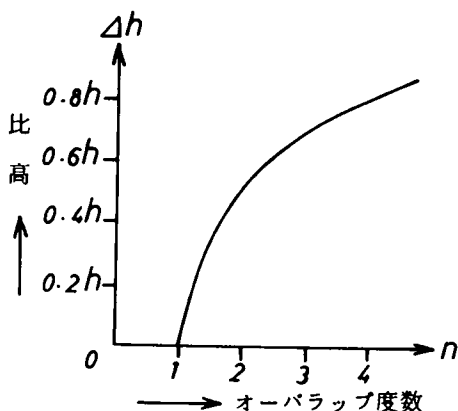


図 85-3 比高による影響

ために係数間の相関係数評価法を述べた。これらの方法を用いてMSS画像の位置合わせをすべきであるが、第4章に使用するMSS画像では式(33-23)、式(33-24)のいずれにも該当しない、段階的な近似tan補正が施されているに過ぎない。なぜなら、式(33-24)を使用して位置合わせする器材が現在開発されていないからである。したがって、Konecny理論などの適用は今後の研究課題となろう。

つぎに、偏位修正要素の挙動からMSSの調査時のオーバーラップ数を求めた。この結果は第4、5章のMSSデータを作成する飛行計画に使用した。以下、本文中から得られた成果をまとめると下記の事項となる。

- (1) 中心投影による撮影条件を適用した場合のサイドラップは約30%必要であると思われる、MSSの調査幅 $2Y_w$ から有効幅 Y_w を定めることによって、今後の飛行計画時の飛行高度を決定する資料となろう。このことは、隣接コースを伴う調査において、コース間距離の決定にも役立つと思われる。なお、上記のサイドラップ量はMSS画像による実体視を前提としていない。
- (2) プラットフォームの飛行方向におけるオーバーラップは式(35-7)で与えることができ現行の写真測量用の航空機ではオーバーラップは約65%程度が十分であることから比高のある場合は $n = 3$ 程度を飛行計画に適用すべきと思われる。また、平地部では $n = 2$ が適当と思われる。

なお、MSS画像作成機ならびにセンサーに対して今後下記の項目の考慮が望まれるので追記事項として示しておく。

- i) 瞬時視野角 β が小さく画素データの精度を向上させるセンサー開発をする。
- ii) 画素の位置合わせを正確にするために偏位修正量の回転要素を機上で補正してデータ抽出する自動制御装置の開発をするか、あるいは解析的に偏位修正量を正確に求めて、地上ステー

ションで位置合わせできる器材の開発が必要である。

参 考 文 献

- 3.1) O. v. Gruber ; 'Ferienkurs in Photogrammetrie,' Stuttgart, 1930.
- 3.2) A. D. N. Smith ; 'The Explicit Solution of the Single Picture Resection Problem, with A Least Squares Adjustment to Redundant', Photogrammetric Record, Vol. 5, No. 25, 1965, p.113~122.
- 3.3) E. L. Merritt ; 'Explicit Three-point Resection in Space', Photogrammetric Engineering, Vol. 15, No.4, 1949, p.649 ~ 665.
- 3.4) E. E. Derenyi, G. Konecny ; 'Infrared Scan Geometry', Photogrammetric Engineering, Vol.32, No.5, 1966, p.773 ~ 778.
- 3.5) G. Konecny ; 'Mathematical Models and Procedures for the Geometric Restitution of Remote Sensing Imagery', Congress of the I. S. P., Rep. 3-1, 1976.7, p.1 ~ 33.
- 3.6) G. Konecny ; 'Geometrische Probleme der Fernerkundung', BuL, No.4, 1972, S.162 ~ 172.
- 3.7) 日本国土海洋総合学術診断委員会 ; “ 「リモートセンシング技術の利用による国土診断に関連する資料の収集」 事業報告書 ”, No.2, 1977. 3, p.79.
- 3.8) N. Jensen ; 'Optical and Photographic Reconnaissance Systems', John Wiley and Sons, 1968, p.151.
- 3.9) 和達清夫 (他) ; “ リモートセンシング ” 朝倉書店, 1976. 8, p.51.
- 3.10) 日本国土海洋総合学術診断委員会 ; 'MSS PRE - PROCESSING SYSTEM報告書, 1975. 9, p.29 ~ 45.
- 3.11) P. Werkmeister ; 'Lexikon der Vermessungskunde', Herbert Wichmann, 1943, S.398.
- 3.12) 前出 1.1), p.125.
- 3.13) 森忠次, 星 仰 ; “ 単写真による運動物体測定法,” 写真測量, Vol.8, No.3, 1969, p.149.
- 3.14) 森忠次, 星 仰 ; “ 調和関数による地形の線情報保管について,” 土木学会年次学術講演会講演概要集 IV, 1974. 10, p.121 ~ 122.

- 3.15) 前出 3.5), p.5 ~ 8.
- 3.16) E. Gotthardt ; 'Einführung in die Ausgleichungsrechnung', Herbert Wichman Verlag, 1968, S.45 ~ 89.
- 3.17) 岡本厚 ; “二媒質写真測量の標定理論とその適用に関する基礎的研究,” 1975. 10, p.83.
- 3.18) 森忠次, 星 仰 ; “ダムの精密三角測量における誤差の検討,” 土木学会論文報告集, No.141, 1967. 5, p.56 ~ 65.
- 3.19) H. P. Bähr ; 'Versuche zur Ermittlung der geometrischen Genauigkeit von ERTS - Multispektral Bildern', BuL, No.1, 1974, S.22 ~ 24.
- 3.20) 星 仰 ; “航空機によるM S Sの幾何学的諸問題に関する考察,” 写真測量とリモートセンシング, 投稿中。

第4章 カラー合成写真の地物判読法

4.1 従来の写真判読と処理の研究

4.1.1 写真判読の経過

空中および地上写真測量の発達とともに写真判読が発展してきた。たとえば、資源調査のために航空写真判読が適用された記録としては、1913年のリビアのBengashiの油田地質調査、1919年のカナダにおける森林調査などがあり、その後、各地の未踏査地区の地質・森林調査などに応用されてきている写真判読分野の研究が進むにつれて、写真地質学 (Photogeology) や写真森林学 (Photo-forestry) が確立されてきた。

前者は空中写真地質学 (Airphotogeology) とも呼ばれ、気球・ヘリコプタ・航空機よりえた空中写真から地質調査を実施して走向・傾斜・地層の厚さ・分布面積・水系密度などの量的計測、地質単位の識別や岩質・地質構造の解読など^{4.1)}を行なって地質に関して有益な情報を抽出し資料収集するものであって、平面もしくは立体的広がりを持つ資料については、案内図・野稿図をはじめ地質図などの図面表示法をも範囲に含んだ学問といえる。

後者は1887年ドイツにおいて気球から森林調査をした時点から芽ばえたともいえ、1908年にイタリアで鉛直写真が撮影されはじめた。森林図の作成は上記カナダの例が最初といわれ、その後、1929年にはSeelyがカナダの森林経営計画に写真調査手法を応用している。^{4.2)}これらのことを基礎として森林調査から森林管理へと研究体制が確立されてきている。

わが国の写真判読の森林分野においては1929年朝鮮半島で実施され、1931年には南樺太、1932年頃からは満州でも撮影が開始されるに至り、撮影と同時に判読がなされてきている。しかし、わが国の本格的な航空写真の判読利用は第2次大戦後で、当初は樹種識別、林相区別、蓄積の算出などを調査目的として、精度・工程・経費について1/40,000縮尺の白黒写真を用いて分析を試みている。^{4.3)}

一方、地質分野の空中写真判読は岩相・岩質・地層の種類・断層・節理など地質学、土壌学、地形学に関する事項について研究が進み、^{4.4)}^{4.5)}土質分類図の作成や土木工事の基礎調査にも応用されるまでに発展してきている。その後、土木工学における道路・鉄道建設や土地利用状況調査に写真判読が適用され、1960年頃にはストリップ画像による交通密度調査なども実施可能となっている。

1960年代までの写真判読は定性的写真利用という傾向が強い。すなわち、写真の解読 (Photo-reading) によって抽出値を得る手法は定性的であり、データ処理の研究がなされていなかった。

たといえる。その後、写真の濃度に着目した濃度測定法の研究が進展し、カナダにおける植生の病虫害調査^{4.6)}、地表調査^{4.7)}、土質の境界の調査^{4.8)}など多分野に応用され、写真判読の経験と写真の濃度測定値から調査項目に対してかなり正確な定量的評価がなされるようになってきた。わが国の工学分野では鳥脇の境界識別の研究^{4.10)}、林業分野では中島の濃度計測機の試作とその適用研究などがあり、その後、濃度測定の自動処理機器の開発とシステム化の研究、濃度抽出値とその位置の関係を図形表示する研究^{4.11)}などが進展してきた。この濃度測定法は写真の濃度とその位置のみによって区分するため被写体の色相や彩度による選別は困難であることが指摘され、ガラス・フィルタ効果を利用して黄色系から赤色系の分離実験が行なわれ、青(B)、緑(G)、赤(R)フィルタを用いた簡易濃度計でも、スライド上に撮影されたJISの色票を1200色程度選別することが可能となった。^{4.13)}これらの濃度測定法と後述する分類手法や電子計算機の利用技術の発展により、地質・植生・人工構造物^(建)の判読の自動化と処理の高速化などの研究が進展している。

つぎに、写真の種類についてはパンクロ写真から赤外白黒写真、カラー写真そして赤外カラー写真^{4.14)}と次第に乳材の開発研究がなされ、被写体と画像の色調差が縮められてきている。このため写真に記録される情報の量の増大と質の改善がなされ、^{4.15)}色彩の差による情報抽出の精度が向上した。その一例を示すと3色分解法による土地利用現況図の色調別面積抽出^{4.16)}^{4.17)}や各種色彩地図の色調分離^{4.18)}などがある。この3色分解法をカラー空中写真に適用し、特定の色調を有する部分を抽出することもできる。写真41-1はカラー航空写真の原図であり、付写4-1~9は色分解結果を示したものである。さらに、付図4-1~9は付写4-1~9のパターンをLP出力したもので、図41-1, 2はこれらを全部もしくは一部分重ね打ち出力させたものである。付図4-1~9は特定の地物(たとえば家屋1個、道路の一区間、河川水の一部)を抽出し、対象以外の類似した地物の抽出状態を調べる目的で作成されたものである。この資料からいえることは目的とした地物は抽出されているが不要な地物までが抽出されている。したがって、航空写真上の地物が複雑な構成をしている地域を色分解法で地物分類することは困難と思われる。

以上のような結果であるから、たとえ写真の周辺光量不足を補正^{4.19)}した空中写真を利用しても、充分満足な地物の抽出を行なえないことは想像できることである。

4.1.2 カラー合成写真判読とその処理

以上は単写真から写真計測をし、データ処理する研究について述べたが、現在発展途上にあるマルチバンド画像^{4.20)}およびMSS画像では、一調査地区に対して白黒ではあるが、複数の画像が供給される。したがって、これらを有効に利用すれば判読・抽出などの精度は向上するが、単写真判読に比べて長時間を要し、複数の地物の相互比較を困難にする傾向がある。このため調査地区を



写真 41-1 武蔵野市（縮尺：約 1/5000）

[illegible][illegible]

判読するにはマルチ画像数を極力減らす必要がある。その方法として、すでに光合成法で周知の合成写真作成法が考えられる。この方法は画像から数組を選定し、各画像の特徴を視覚表示するために数種のフィルタを各画像にかけ、同一平面上に合成画像として結像させるものである。この方法は加色混合法として知られている（図41-3参照）。この加色混合法によるカラー合成写真を作成する器材はリモートセンシング画像用としてもすでに実用化されているが、画像の組合せ方、カラー合成写真の判読法などにつ

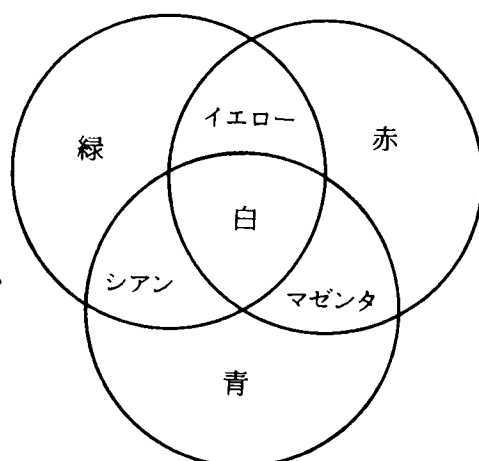


図 41-3 加色混合図

いては研究すべき点が多く、またカラー合成写真の定量的評価法の研究はほとんどなされていない。そこで、本章では肉眼では捕えられない波長帯の情報をも可視光域の情報として変換できるカラー合成写真を用いた写真判読法を提案する。この方法はカラー合成写真上の地物の色調をコード化し、コード化された数値によって地表物体を分類するものである。この分類結果の総合評価には情報理論によるあいまい度を適用することにした。

なお、本章で用いるカラー合成写真の色調による地物の分類項目である地表クラスの識別基準は条件付き最大値法によることにした。これはMSSデータが波長帯による放射輝度によること、色調の原色がB, G, Rであることなどに注目し、分析地区ごとにあらゆる色調を必要としないことなどを加味したものである。識別基準によって分類する方法は色調コード空間法によるもので、この方法はMSS画像から分析地区の撮影状態、地物の構成およびデジタル解析への定性的判断による適用性などを観察しながら、簡易かつ迅速に地物を分類できることを目標としている。この色調コード空間法は電子計算機に格納する配列要素に着目したもので2次元もしくは3次元1価関数を適用してデータ処理を行なっている。この方法によれば、色調コードの順序をいかに入れ換えても分類結果に全く影響しないのが特徴であり、正規性のない変数を用いる解析などにも応用できよう。

4.2 カラー合成写真の作成法

カラー合成写真を作成する目的はMSS画像数を減らすこと以外に、デジタル解析を実施する以前に分析地区の地域特性を分析者が十分理解できる資料を提供することでもある。カラー合成写真作成のための原データとしては、FMテープ、CCT, CCCTの3種があり、得られた写真

も3種に大別され、それぞれ利用目的が異なる。FMテープの生データを画像化したMSS画像は、分析地区の雲の分布や撮影状態の概要を調べるのに重要な資料である。

こうして、データが目的とする調査に有効であると判断されたときには、CCTもしくはCCCTの磁気テープが作成される。これらから、MSS画像を作成することは分析地区を詳細に判読する上で重要な資料である。

このような観点から、FMテープのデータより作成されたカラー合成写真(P_{MSS} と記す)と一般のデジタル解析に用いるCCTから作成されたカラー合成写真(P_{CCT} と記す)の作成法について以下述べる。

4.2.1 FMテープによるMSS画像のカラー合成写真

ある限定された地域における対象物の変化もしくは2種類以上の特性を異にした被写体を選別するために時系列画像や波長帯の異った画像などの縮尺を統一して、フィルム、スクリーン、ブラウン管などに投影し、必要に応じて写真とすることが合成写真作成の基本例である。

ここではMSSより得られた各チャンネル像 v_1, v_2, \dots, v_n から合成写真 V_i を作成することに限定して述べる。

MSS画像から合成写真を作成するには単チャンネル画像を合成する場合とチャンネル演算画像を合成する場合とがある。前者によれば、カラー合成写真からでも単チャンネルの持つ特性が推定できるが、チャンネル数が増大してくると画像の組合せが多種に及び、これらの種類から有用なチャンネル画像を選別することが困難である。後者は単チャンネル情報の特性を組合せて、地物判別に適した画像となるようにチャンネル間の演算をした画像 v'_1, v'_2, \dots, v'_i をさきに作るから、合成に利用する画像の種類は自ら減少することになる。図42-1はMSS画像からカラー合成写真を作成する手順である。

単チャンネル画像から合成写真を作成する原画像の選択の種類数 S_i はMSSのチャンネル数 n より A_i 個のチャンネルが選択されたとすれば式(42-1)で与えられる。

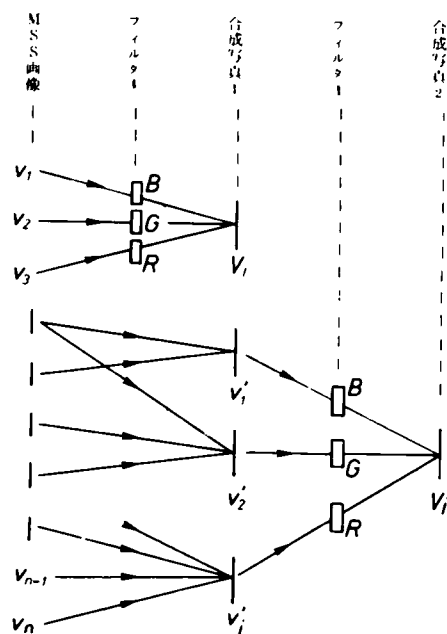


図42-1 MSS画像のカラー合成法

$$S_1 = {}_nC_{k_1} \quad \dots\dots\dots (42-1)$$

さらに、 k_1 個のチャンネルに用いるフィルタの種類を k_2 とすればカラー合成写真の種類数 S_{sim} は式(42-2)となる。フィルタの重複利用は考えないことにする。

$$S_{sim} = k_1 P_{k_2} \cdot S_1 \quad (k_1 > k_2) \quad \dots\dots\dots (42-2)$$

つぎに、チャンネル演算をチャンネル和のみで行なう場合のチャンネル演算画像 v_i^1 の種類 m_i は式(42-3)となる。これに単チャンネル画像を加えた m_0 種のチャンネル和の演算画像から k_3 個の画像を選定しフィルタの選択数 k_2 としたとき、カラー合成写真の種類 S_{mul} は式(42-4)となる。

$$m_i = 2^n - (n+1) \quad , \quad m_0 = m_i + n \quad \dots\dots\dots (42-3)$$

$$S_{mul} = m_0 C_{k_3} \quad \dots\dots\dots (42-4)$$

これらの関係式において現在多用されている場合について数を当ててみよう。チャンネル数 $n=11$ 、フィルタの種類 $k_2=3$ であって、 $k_1=3$ としても $S_{sim}=495$ となり S_{mul} においては膨大な数となる。これらの S_{sim} 個や S_{mul} 個の組合せを分析者が試みることは、ほとんど不可能に近い。そこで、チャンネル演算の特徴を取り入れながらカラー合成写真の組合せ数を限定することが必要であり、その限定の意味づけが必要である。以下、限定画像を作成する理由と作成法について述べる。

(1) 画像とフィルタの選択

わが国で実用化されている M S S の波長帯区分とチャンネル番号の一種類は図42-2に示す通りであって、各チャンネルの特性を可視部、近赤外部および中間赤外部に分けられよう。可視部はB(青バンド)、G(緑バンド)、R(赤バンド)が基本である。これらのことからカラー合成写真を作成する限定画像は青、緑、赤、近赤外および中間赤外の5種とする。

つぎに、5種の画像からカラー合成写真を作成するためには、肉眼で判断できる可視光域に図42-2の5バンドの数種類を対応させる必要がある。可視光域の色調はB、G、R.のフィルタを通した光線の組合せによって作り出すことができることからフィルタ数はB、G、R.の3個とすることにする。このとき、3種のフィルタをかける画像をいかに選定するかという問題を生じる。そこでまず、青バンド、緑バンドおよび赤バンドの順にB、G、R.のフィルタをかけたリアルカラー合成写真を作成することは判読用写真として一般的といえよう。つぎに、赤外線カラー写真として知られている種類を作成することは、従来の赤外線カラー写真の判読技術を応用するのに都合のよいことである。そこで、緑、赤そして赤外バンドの順にB、G、R.フィルタをかけフォールスカラー合成写真を作成することにする。また、中間赤外バンドは別名、熱バンドとも呼ばれ温度情報を提供してくれる。そこで熱バンドは赤のフィルタをかけることとし、フォールス

カラーと対比可能なようにすることにしてシュード
ッカラー合成写真と呼ぶことにする。

上記のバンドとフィルターの組合せによって図
42-2 のチャンネルからカラー合成写真を作成
する資料を示したのが表42-1である。⁴²¹⁾

- (2) 分析地区は和歌山県御坊市を含む飛行コースの
区域に位置している。この飛行ラインのMSSデ
ータは表23-1のディーダラスの11チャンネルの
検出器によって抽出されたものである。

そこで、表42-1で説明した青、緑、赤、近赤
外および中間赤外の5バンドをまず作成すること
にした。この5バンドを写真42-1に示す。この
写真内のTEST-1, 2は2ヶ所の分析地区を意味
する(詳細は図42-3参照)。この5バンドと
BGRフィルターによって作成したカラー合成写
真の内、TEST-1 のリアル・フォールス・シュ
ードッを写真42-2～4に、TEST-2のそれを

写真42-5～7に示した。また、写真

42-8はTEST-1 の70mmハッセル

ブラード航空写真を示したものである。

以下参考のためにMSS画像をえた諸
条件を下記に示しておく。

- ① MSS調査日；1974.10.5.
- ② 飛行高度；約1500m
- ③ MSS画像縮尺；約1/20,000.
- ④ MSS調査総面積； $2.4 \times 24.0 \text{ km}^2$.
- ⑤ 画素寸法；約直径3.75m.
- ⑥ カラー合成写真の縮尺；約1/12,000.
- ⑦ 70mm航空写真縮尺；約1/37,000.
- ⑧ 分析地区面積；各 $2.4 \times 2.4 \text{ km}^2$.
- ⑨ 都市計画図；1/3,000. (グランドトゥルースのデータを記入してある)

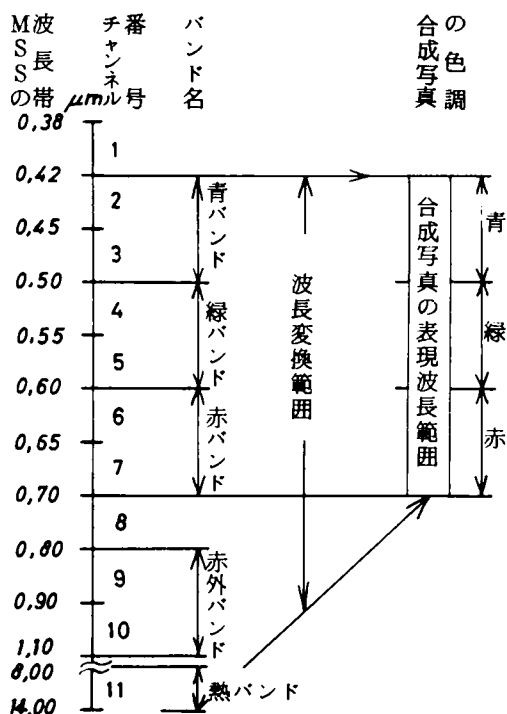


図42-2 MSSと合成写真の感知波長の関係

表42-1 バンド画像とフィルターの関係

チャンネル	波長域(μm)	バンド 画像	カラー合成用 フィルター		
1	0.38 - 0.42	(2・3) 青	B		
2	0.42 - 0.45				
3	0.45 - 0.50				
4	0.50 - 0.55	(4・5) 緑	G	B	B
5	0.55 - 0.60				
6	0.60 - 0.65				
7	0.65 - 0.70	(6・7) 赤	R	G	G
8	0.70 - 0.79				
9	0.80 - 0.89				
10	0.92 - 1.10	(9・10) 近赤外		R	
11	8.00 - 14.00				
カラー合成写真の名称			リアル カラー	フォールス カラー	シェードの カラー

なお、上記都市計画図にはMSS調査日以前に3日間、農地、空地を中心にした現地調査を行なった結果を記入しておき、さらにMSS調査日に調査記入図の検照と修正を実施した。YS-11航空機（高度1500m）以外に、より低空に単発セスナ機（高度200～500m）で調査をし、地上調査とMSS調査

位置の食い違いによる調査不足を補うことにした。セスナ機調査は35mmアマチュアカメラによるものでフィルムの種類はスライド用ナチュラルカラー、赤外線カラーおよびプリント用ネガカラーの3種である。

4.2.2 CCTによるカラー合成写真

磁気テープに格納されたデジタル・チャンネルデータを用いてカラー合成写真を作成する概要は図32-3に示したごとくPMSS写真作成より手順が複雑となる。

PMSS写真の場合はFMテープから直接処理でき迅速かつ低廉であるのに対し、PCCT写真はFMテープからCCTを作成するためPMSSに比べ迅速性に多少欠ける傾向がある。このPCCT写真を作成するには各画

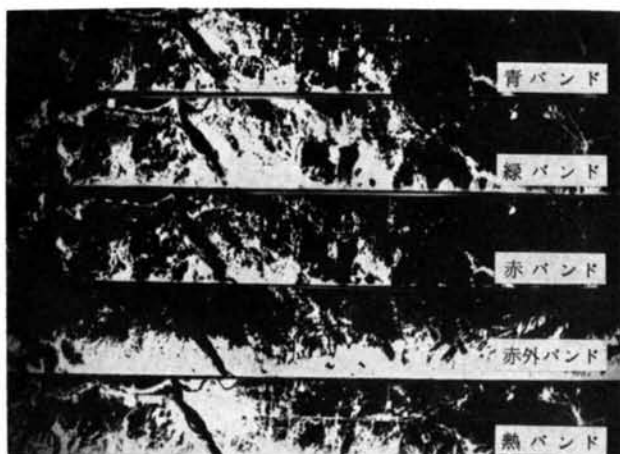


写真42-1 飛行コースのバンド別MSS画像
(調査地区 $2.4 \times 24.0 \text{ km}^2$)

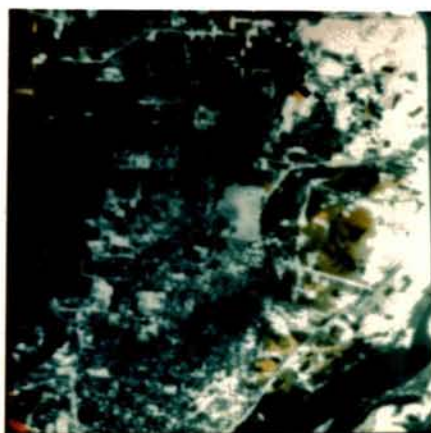


図42-3 合成写真の判読分析地区 TEST1, TEST2.

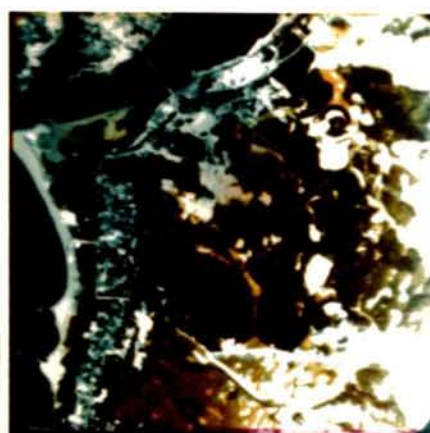
TEST1地区 (Pmss)

TEST2地区 (Pmss)

(イ)



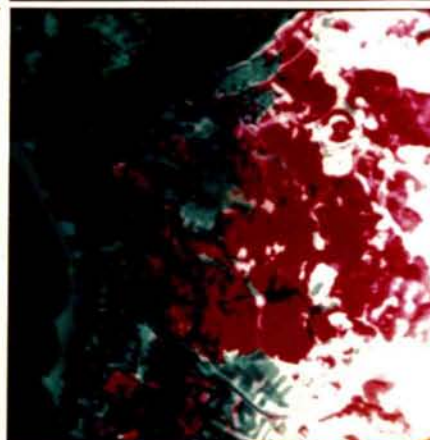
(ニ)



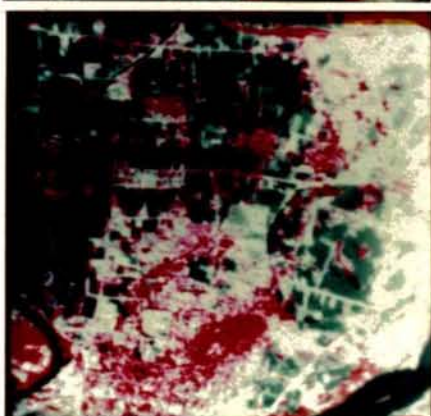
(ロ)



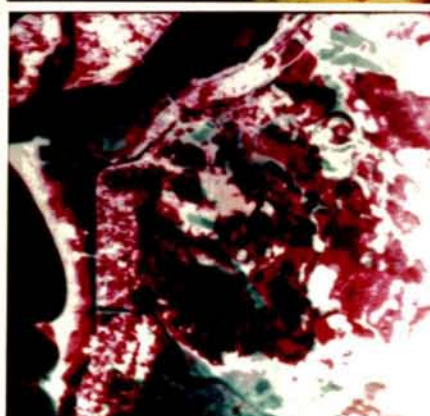
(ホ)



(ハ)



(ヘ)



(イ)写真42-2
(ニ)写真42-5

(ロ)写真42-3
(ホ)写真42-6

(ハ)写真42-4
(ヘ)写真42-7

} リアル,

} フォールス

} シュードゥ

TEST1地区 (PCTT)

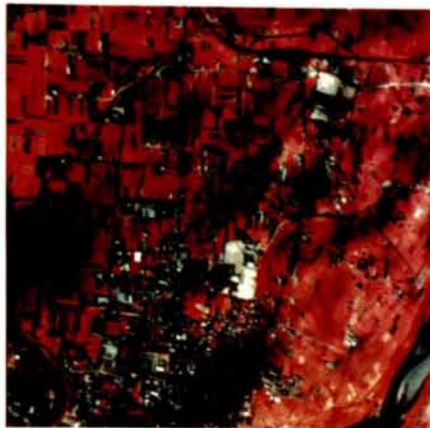
70A . 075 .



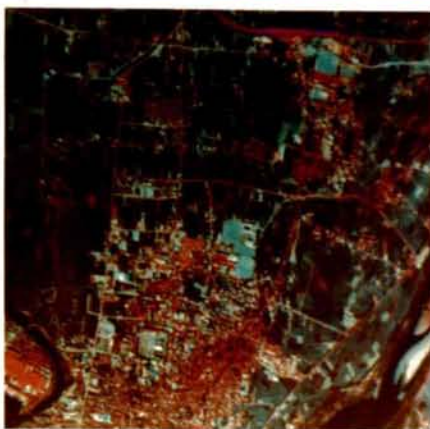
(ト)



(ヌ)



(チ)



(リ)

(ヌ)写真42-8

(ト)写真42-9 (リアル)

(チ)写真42-10 (フォールス)

(リ)写真42-11 (シュードウ)

素データの $8bit$ のレベルを光の強度に変換し、チャンネルごとにフィルターを通した光線がダイクロミックミラーを介して加色式にしてフィルムに同時露光する。この方法を採用したフォトリソグラフィを用いて1画素 $100 \times 100 \mu m^2$ のスポットサイズでシートネガフィルム上に焼付け、写真42-8のTEST-1地区のリアル、フォールス、シュドゥカラー合成写真PcCTを作成することにする。PcCT写真の判読資料はPmSS写真とはほぼ同縮尺（ $1/12,000$ ）とした。このPcCT写真を写真42-9～11に示す。

PcCT写真はPmSS写真に比べ画質が非常に良好であることが作成の結果明らかとなった。^{注)}ただし、PcCT写真は写真42-1のように一度画像化されたものを視覚的に観測して合成するのではなく、磁気テープのデータから直接写真化するためPcCT作成に長時間を要し、しかも焼付状態が観測できないため、合成するチャンネルごとの放射輝度の範囲を計測者が十分理解していないと、写真42-9のPcCTリアル写真のごとく1つのチャンネルの色調が強調されすぎたり、あるいは弱すぎたりする問題を生じやすい。地物を判読するにはチャンネルの画素データの最大と最小が各色で同一になるように事前指定をすることも今後考えられるが、今回は未経験のためチャンネル別の事前指定は行っていない。すなわち、各チャンネルともレベル0を光量最小に、レベル255を光量最大とした。

4.3 カラー合成写真による地物の分類法

一般に分析地区の画素を地表クラスに割り当てる統計学的手法にはユークリッド距離法、線形判別分析法および最尤法などがある。これらの手法に用いられる変数ベクトルは変数のレベルの順序に意味を持ち、MSSのデジタルデータにおける変数のレベルの順序は各波長帯における地物の放射輝度の強さの順序である。いま、カラー合成写真の地物判読では地物色に注目して分類を試行し、地物色を1変数で表現することを想定している。この1変数の順序（色調のコード化の順序）に物理的意味を持たせることは困難である。そこで変数の順序に全く関係なく分類できる方法を採用する必要がある。これらの点を考慮したのが色調コード空間法である。

色調コード空間法ではカラー合成写真の地物の色調（たとえば家屋の屋根の平均色調、田畑の作物の平均色調など）を1つの変数で表わすことにし、そのために地物の色調をコード化し、それぞれの色調を1次元上の点（整数値）で表わす。また、変数ベクトルの種類数はカラー合成写

注) 後日判明したことであるが写真42-1のMSS画像作成時では処理機材が幾分不明であったこと、作業者が熟練していなかったことなど、各種の悪条件が加わっており、写真42-2～4の右側の白色部の情報欠損部もこれらの原因によるものである。最近ではもう少し良好な写真が得られる。

の分類による、この写真

真から同一の地物を選んで、それぞれの写真における色調をコード化すれば n 次元空間座標上の1点として地物を表現することができる。この空間を色調コード空間と呼ぶことにする。いま、分類項目の異なる地物が色調コード空間において同一値を占めないとすれば、分類項目ごとに色調コード空間上の点を指定できる。これを識別基準 \bar{E} とし、以後の地物の判読結果を合成写真ごとに色調コードで表現すれば、色調コード空間上の座標値によって各地物を分類項目に割り当てることができる。また、個々の点に複数の分類項目のデータが存在するときは、各分類項目ごとに存在する確率から識別基準 \bar{E} を決定すべきであろう。この章で取り扱うカラー合成写真はリアル・フォールス・シュードウの3種であるから、3次元の色調コード空間となる。しかしながら、地物判読に対する3種のカラー合成写真それぞれの単独効果は3次元空間の利用によって明らかにすることができない。そこで、おのおののカラー合成写真の効果を調べるために、2次元空間^{4,22)}と3次元空間による分類をともに用いることにする。これらの分類結果を用いてあいまい度の適用性をも調べることにする。

この色調コード空間法の適用に際し、各分類項目の標本数が識別基準に影響すると考えられる。また、色調コード空間上に存在する点に出現する確率がほとんど等しい地表クラスがあれば識別基準の決定方法が問題になる。これらの事項を考慮しつつ、以下 P_{MSS} , P_{CCT} 写真を用いた地物の分類法を述べる。

4.3.1 MSS画像による P_{MSS} 写真の地物分類法

FMテープより作成されたMSS画像を用いて得られたカラー合成写真 P_{MSS} を資料として地表の物体を分類するには、写真判読の各要素（たとえば色調、陰影、寸法、型、相互位置の関係など）による方法、もしくはこれらの要素を統合する方法も考えられるが、MSSの場合基本的なデータは波長帯ごとのレスポンスの差異であることから、写真上の色調のみを分類要素として取り上げて地物分類を試みることにする。このとき写真上の地表クラスは目的に応じて分類項目を与えられているものとし、それぞれの分類項目ごとの存在位置は地図、航空写真を参考にして知ることができるかと仮定する。

本章では一例として水域、植生、土壌および人工構築物を基本分類項目として与えることにする。分析地区の分類項目は基本分類項目をさらに細分化して決定する方法を採用することにする。

(1) 地物の色調のコード化と表現法

分析地区TEST-1のリアル・フォールス・シュードウのカラー合成写真を判読して、分類項目に該当する地物の色調をあらかじめ少数摘出して調べ、視察による判断の容易さや彩度の区分なども考えたところ、表43-1の14種類として地物の色を表現するのが妥当と考えたので、

表43-1のごとく色調にコード番号を付けた。つぎに分析地区TEST-2の地物の代表的なものを抽出し、表43-1の色調区分であることが解った。この結果から表43-1を以下の分類に使用することにした。表43-1のコード番号をコアー保管形式Uとして表現するには通常1地物に対してリアル・フォールス・シュードウの3種のコード番号を3変数として与えねばならない。そこで、計算機容量を少なくするためにUを式(43-1)の形式とし整数の桁によって3種のコード番号を表現することにする。

$$U = a_0 \times 10^5 + a_1 \times 10^4 + a_2 \times 10^3 + a_3 \times 10^2 + a_4 \times 10^1 + a_5 \dots \dots \dots (43-1)$$

ここに、 a_1, a_0 はリアル； a_3, a_2 はフォールス； a_5, a_4 はシュードウのコード番号である。

分析地区TEST-1のカラー合成写真上の個々の地物を判読し、地表クラスの種類ごとに式(43-1)のUを求めれば2次元ないし3次元の色調コード座標上の点に出現する地表クラスの確率が求められる。たとえば、3次元空間上の点 E_{hij} を地表クラスと指定できれば、 E_{hij} を地表クラスのラベル i で置き換えることができ、識別基準 \bar{E} が決定された。

このTEST-1の識別基準 \bar{E} と分析地区TEST-2の地物の色調コード番号UからTEST-2の地物を地表クラスに割り当てることことができる。

(2) 2次元色調コード空間による分類法

2次元色調コード空間は平面直交座標(i, j)上に $i = 1 \sim 14, j = 1 \sim 14$ の点が存在する。この i, j の2変数とはリアル、フォールス、シュードウの3種の写真より異った2種を選別したときのそれぞれの色調であり、 i, j の組合せは3種存在することになる。

いま、分析地区の地表クラスと変数 i, j が決定されたとき、分析地区のおおのの地物はいずれかの地表クラスに割り当てることにすれば、各地物の i, j 値の個数をもって点 E_{ij} の頻度を与えることになる。この点 E_{ij} の頻度を n_{ijq} (q は地表クラスの種類を表わす)とするならば、分析地区の総判読標本数 N 、各地表クラス別の総判読標本数 N_q の間には式(43-2)～(43-4)の関係が成立つ。

$$N_q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n n_{ijq} \quad (q = 1, 2, \dots, k) \dots \dots \dots (43-2)$$

表43-1 カラー合成写真の色調コード

色 番 号	色 調
11	白
12	淡々青
13	淡青
14	青
15	濃青
16	紫
17	黄
18	黄緑
19	緑
20	濃緑
21	淡赤
22	赤
23	濃赤
24	黒

$$N = \sum_{g=1}^k N_g = \sum_{g=1}^k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n n_{ijg} \quad \dots\dots\dots (43-3)$$

$$N_{ij} = \sum_{g=1}^k n_{ijg} \quad \dots\dots\dots (43-4)$$

また、各 E_{ij} における頻度分布 n_{ijg} の出現確率 p_{ijg} は式 (43-6) の条件下で式 (43-5) となる。

$$p_{ijg} = n_{ijg} / N_{ij} \quad \dots\dots\dots (43-5)$$

$$\sum_{g=1}^k p_{ijg} = 1 \quad \dots\dots\dots (43-6)$$

点 E_{ij} の地表クラスのラベル付けは式 (43-5) の出現確率の大きさにより決定することとし、周辺の点の出現確率は考慮しないものとする。以下には、数種の分類手段を示すことにする。

いま点 E_{ij} において、出現確率 p_{ijg} ($g=1, 2, \dots, k$) を最大にする地表クラスの種類 $g=t$ が存在するとき $E_{ij} \in t$ とし、このような t が存在しない場合は $E_{ij} \in 0$ とする。この分類法を最大値法と名付ける。この最大値法の問題点は t が複数存在したときの処理^{4.23)} と p_{ijg} が同程度の出現確率を持つとき $E_{ij} \in t$ になる識別基準を使用すれば誤分類を生じやすいことになる。

これらの問題点を同時に解決するために $p_{ij,t} > \frac{1}{2}$ の条件を付けることにした。^{4.24)} この方法を条件付き最大値法と名付けることにする (図43-1 参照)。

条件付き最大値法によって決定された識別基準 \bar{E} を用いて、分析地区 TEST-1 の各点 E_{ij} を地表クラスのラベルで指定して分類すれば、見掛けの抽出率が求められ分類法の信頼性を評価することができる。なお、地表クラス $g=t$ の見掛けの抽出率を r_{gt} で表わすと r_{gt} は式 (43-7) によって定義する。

$$r_{gt} = \frac{100}{N_t} \sum \sum Q_{ijt} \quad \dots\dots\dots (43-7)$$

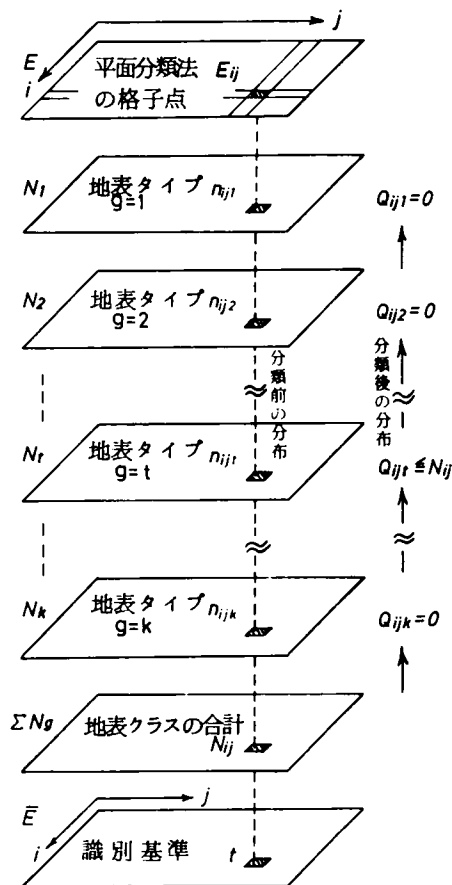


図 43-1 識別基準 \bar{E} による 2 次元的分類結果 Q_{ijt}

ここに、 Q_{ijt} は点 E_{ij} の全頻度数 N_{ij} が条件付き最大値法によって割り当てられた度数を表わしたもので、 $q \neq 0$ では $N_{ij} = Q_{ij0}$ となり $Q_{ijt} \geq n_{ijt}$ が成立つ。また、 $q = 0$ においては $N_{ij} \approx Q_{ij0}$ となり $Q_{ij0} = 0$ となる。仮に t が存在するとき $Q_{ijt} - n_{ijt}$ が誤分類量となる。 Q_{ijt} の中で t の頻度 n_{ijt} (図 43-1 参照) は正しく分類されるものであることから n_{ijt} を改めて P_{ijt} とすると真の抽出率 r_p は式 (43-8) として定義できよう。

$$r_{pt} = \frac{100}{N_t} \sum \sum P_{ijt} \quad \dots\dots\dots (43-8)$$

ここに、 $q \neq 0$ のとき $P_{ijt} = n_{ijt}$ が成立ち $q = 0$ のとき $P_{ijt} = 0$ となるものである。また、式 (43-8) から地表クラス t が他の地表クラスに属した比率を求めることができる。

いま、 i, j の 2 変数の組合せをリアル・フォールス : (A)、フォールス・シュードウ : (B)、シュードウ・リアル : (C) として表現することにすれば、3 種類 (A)、(B)、(C) の頻度分布 N_{ij} から真^{4.25)}の抽出率と見掛けの抽出率を式 (43-9)、(43-10) として表わすことにする。

$$\left. \begin{aligned} {}^A r_{pq} &= \frac{100}{N_q} \sum_i \sum_j {}^A P_{ijq} \\ {}^B r_{pq} &= \frac{100}{N_q} \sum_i \sum_j {}^B P_{ijq} \\ {}^C r_{pq} &= \frac{100}{N_q} \sum_i \sum_j {}^C P_{ijq} \end{aligned} \right\} \quad (q = 1 \sim k) \quad \dots\dots\dots (43-9)$$

$$\left. \begin{aligned} {}^A r_{qq} &= \frac{100}{N_q} \sum_i \sum_j {}^A Q_{ijq} \\ {}^B r_{qq} &= \frac{100}{N_q} \sum_i \sum_j {}^B Q_{ijq} \\ {}^C r_{qq} &= \frac{100}{N_q} \sum_i \sum_j {}^C Q_{ijq} \end{aligned} \right\} \quad (q = 1 \sim k) \quad \dots\dots\dots (43-10)$$

これらの式から ${}^A r_{qq} - {}^A r_{pq}$ 、 ${}^B r_{qq} - {}^B r_{pq}$ 、 ${}^C r_{qq} - {}^C r_{pq}$ が得られ、見掛けの抽出率に含まれる誤分類率が求められる。

ところで分析地区の地表クラスの標本数により、点 E_{ij} の出現する確率が変わってくる。一般に識別基準を決定する分類項目の^{実験確}軽重率を等しく考えるから地表クラスの標本数を等しくする方がよい。しかし、分析地区の特性から標本数を等しくすることは困難なことである。そこで、地表クラスの標本数の比で点 E_{ij} の頻度 n_{ijq} を表現した n'_{ijq} を用いる。

$$n'_{ijq} = n_{ijq} \cdot N'_q / N_q \quad \dots\dots\dots (43-11)$$

ここに、 N'_q は地表クラスの標準標本数でありデータ適用時には $N'_q = 100$ を用いることにする。なお、式 (43-11) を用いた条件付き最大値法による識別基準に基づいた分類を 2 次元的分類

法と略称することにする。

(3) 3次元の色調コード空間による分類法

前述の2次元的空间による分類は2種のカラー合成写真を用いる場合には有効であるが、本章のように3種の写真を利用できる場合には、主として各種事項の予備実験用（たとえば識別基準決定のための標本数の取り扱い、見掛けの抽出率に内在する誤分類率）の意味しか持たない。そこで、3種の P_{MSS} 写真を用いた3次元色調コード空間分類法の効果を検討する目的で行う。ここでは、条件付き最大値法（以下3次元的分類法と略称する）を適用し、下記の手順に従って実施する。

i) リアル、フォールス、シュドゥカラー合成写真の色調コード番号 U を直交する3次元座標軸 h, i, j 上に取り（図43-2参照）、 14^3 の格子点 E_{hij} を決定する。

ii) 各カラー合成写真から判読される地物の色調コード番号 U を定め、いずれの地表クラスに属するかを調べる。

iii) 各立体領域 E_{hij} の頻度分布 n_{hijq} を算出し、 Nq を求め、 $Nq=100$ を与えて、 n'_{hijq} を式（43-14）に従って求める。

iv) 条件付き最大値法により識別基準 \bar{E}' を定める。

v) 識別基準 \bar{E}' によって分析地区の標本がいずれの地表クラスに属するかを指定し、その結果を用いて抽出率 r_p, r_q を計算する。

vi) 地表クラスの標本の分類前後の関係を情報の伝達と考え、分類結果から通信路行列の各要素を頻度で表わした通信路行列の資料（以下検証行列という）を作成し、これを用いて次節で示す式（44-9）のあいまい度の尺度を算出する。

以上の手順によって分析地区 $TEST-1, TEST-2$ のデータ処理を行ない、 P_{MSS} 写真のあいまい度の尺度 $T(G, \bar{G})$ を P_{CCT} 写真の $T(G, \bar{G})$ の比較検討の資料とする。

4.3.2 CCTによる P_{CCT} 写真の地物分類法

この方法は、計算機用に MSS データをディジタル変換した CCT から作成された3種のカラー合成写真 P_{CCT} を用いて地物の色調を判読し、地物の色調コード番号を入力データとして4.3.1で述べた2次元のおよび3次元の分類を適用する方法である。以下、 P_{MSS} 写真の分類過程と異

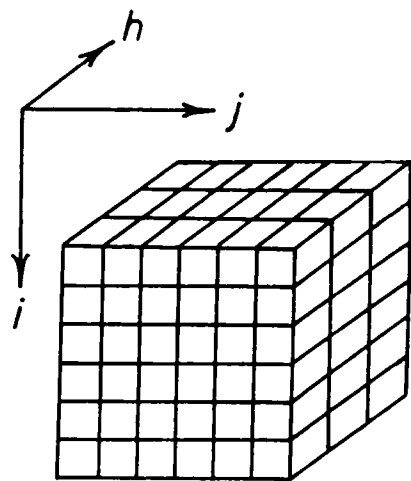


図 43-2 3次元空間法の E_{hijq}

なる部分について ^{の分類結果} P_{CCT} 写真を説明する。

P_{CCT} 写真は P_{MSS} 写真と色調もかなり異なるが、表 43-1 の色調表示ではほとんどの地物を表現することができる。ただし、裸地については薄茶系色が含まれていたため表 43-1 の不用色である薄赤と交換することにした。したがって、色調番号 21 は薄茶とし他は表 43-1 と同様である。



地物の判読は P_{MSS} 写真と同様であるが、雲の影の部分が P_{CCT} 写真の方がフォールスカラー合成写真においてより明確に現われ、判読対象として好ましくない地域を P_{MSS} 写真より正確に定めることができた。そこで、写真 43-10 から雲の影の影響を受けている部分を抽出し、 の斜線で図 43-3 に示した。つぎに、 P_{MSS} と同様に、文献 3.20) における陰影空間や死角空間が走査角度に影響することがわかったので、判読時には、走査角 θ が 30° 以下の部分を判読対象地区とした。走査角 $\theta > 30^\circ$ の地区には図 43-3 上に  なる点分布で示してある。この図 43-3 の白色部分はデジタル解析の分析地区を選定する資料として重要と考える。



図 43-3 判読対象地域（白色部分）

図 43-3 の白色部分の地物判読を行ない、地物の色調のコード化をして得られた成果よりあいまい度の尺度などを求め、 P_{CCT} と P_{MSS} の分類結果の比較の検討を行なうことにする。

4.4 あいまい度の尺度による分類結果の評価法

カラー合成写真はチャンネル画像もしくはチャンネル演算画像を用い、各画像の濃淡とフィルター効果を利用して作成されるものである。このカラー合成写真は 4.2 で述べたごとく多種に及ぶ。したがって、表 42-1 の画像とフィルターの組合せが判読効果を最適にする保証はない。さらにまた、色調コード空間による分類法の適用あるいは分類項目の数の決定とその種類の最適条件を知る方法もない。

これらの分類過程の要因を変化させて分類結果を得、この結果からある評価尺度を用いて要因変化に対する分類結果の変化を調べることができれば都合がよい。

そこで、地物の色調を利用して地物が色調コード空間法の分類手法によって地表クラスに割り当てられるという現象が情報通信過程の現象に類似していることに着目し、地物を送信の文字とし分類後地表クラスに割り当てられた地物を受信の文字として対応づけることができよう。

いま、事前に地物が既知で、その色調コード番号と地物の属する地表クラスを知ることができ

るとき、これらの地物が分類される過程を調べることによって自己の地物を含む地表クラスに割り当てられたのか、あるいは他の地表クラスのいずれに割り当てられたのかを知ることができる。分類前の各地物が地表クラス q_1, q_2, \dots, q_k に属しており、色調コード空間法によって分類された後の地物が属する地表クラスを $\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_s$ とするならば、分類前の e 番目の地表クラス q_e に含まれている個々の地物は図44-1のごとく

1種もしくはそれ以上の地表クラスに割り当てられる。一般に分類前の地表クラス q_1, q_2, \dots, q_k (以後まとめて G で表わす) と分類後の地表クラス $\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_s$ (以後まとめて \bar{G} で表わす) とはクラス数は一致しないので、本章では $s = k + 1$ として解析することにする。

地表クラス q_e に含まれる標本が分類され各地表クラス \bar{G} に $m_{e1}, m_{e2}, \dots, m_{ek}, m_{es}$ 個割り当てられたとき、 m_{es} は条件付き最大値法の識別基準 \bar{E} の点 E_{ij} で $q = 0$ (4.3.1の(2)参照) と決定された基準から得られたものである。

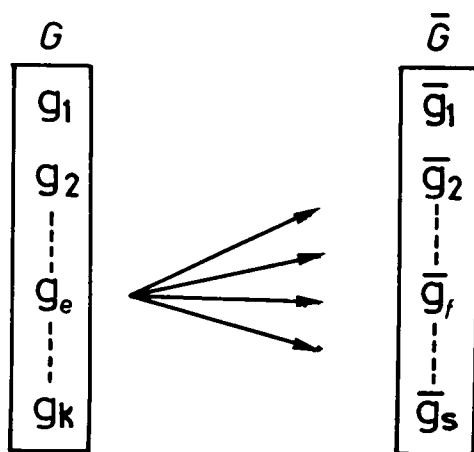


図 44-1 分類前後の地表クラス G, \bar{G}

いま、分類結果から得られた m_{ef} からなる式 (44-1) の頻度行列 M が与えられることになるので、式 (44-2) の関係を用いて通信路行列 P を式 (44-3) として求めることができる。

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1k} & m_{1s} \\ m_{21} & m_{22} & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ m_{k1} & \dots & m_{kk} & m_{ks} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (44-1)$$

$$p_{ef} = m_{ef} / \sum_{e=1}^k \sum_{f=1}^s m_{ef} \quad \dots\dots\dots (44-2)$$

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1k} \\ p_{21} & p_{22} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ p_{k1} & \dots & p_{kk} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (44-3)$$

式 (44-3) の通信路行列要素から式 (44-4) を求めれば、 G, \bar{G} のエントロピー $H(G)$,

$H(\bar{G})$ は式 (44-5) として与えられる。

$$p(q_e) = \sum_{f=1}^k p_{ef}, \quad p(\bar{q}_f) = \sum_{e=1}^k p_{ef} \quad \dots\dots\dots (44-4)$$

$$\left. \begin{aligned} H(G) &= \sum_{e=1}^k p(q_e) \log p(q_e) \\ H(\bar{G}) &= \sum_{f=1}^k p(\bar{q}_f) \log p(\bar{q}_f) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (44-5)$$

つぎに、 G と \bar{G} との結合エントロピー $-H(G, \bar{G})$ は式 (44-3) の p_{ef} を用いることによって式 (44-6) の関係が成立つ。

$$H(G, \bar{G}) = - \sum_e \sum_f p_{ef} \log p_{ef} \quad \dots\dots\dots (44-6)$$

式 (44-4) の $H(G)$ は分類前のエントロピーであり、 G を知ったときの \bar{G} の条件付きエントロピーは $H(\bar{G} \setminus G)$ となる。逆に \bar{G} を知ったときの G の条件付きエントロピー $-H(G \setminus \bar{G})$ は式 (44-7) となる。式 (44-5) の $H(G)$ と式 (44-7) の $H(G \setminus \bar{G})$ の差は G と \bar{G} の相互情報 $I(G; \bar{G})$ として与えられ、^{4,26)} 式 (44-8) のようになる。

$$H(G \setminus \bar{G}) = - \sum_e \sum_f p_{ef} \log p(q_e \setminus \bar{q}_f) \quad \dots\dots\dots (44-7)$$

$$\begin{aligned} I(G; \bar{G}) &= H(G) - H(G \setminus \bar{G}) \\ &= H(G) + H(\bar{G}) - H(G, \bar{G}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (44-8)$$


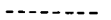



ここで相互情報 $I(G; \bar{G})$ と $H(G)$ の比を “あいまい度の尺度” $T(G, \bar{G})$ として定義すると、これは式 (44-9) で示される。^{4,27)}

$$\begin{aligned} T(G, \bar{G}) &= I(G; \bar{G}) / H(G) \\ &= \{H(G) + H(\bar{G}) - H(G, \bar{G})\} / H(G) \\ &= \{ \sum p(q_e) \log p(q_e) + \sum p(\bar{q}_f) \log p(\bar{q}_f) \\ &\quad - \sum \sum p_{ef} \log p_{ef} \} / \sum p(q_e) \log p(q_e) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (44-9)$$

上式の $T(G, \bar{G})$ は $0 \leq T(G, \bar{G}) \leq 1$ の範囲の値をとることになり、識別基準に全く雑音がなく q_e がすべて \bar{q}_e に分類されたとき $T(G, \bar{G})$ は最大値 1 となる。また、識別基準に雑音が多く $p_{ef} = 1/k^2$ となったとき $T(G, \bar{G})$ は最小値 0 となる。

このあいまい度の尺度 $T(G, \bar{G})$ は本研

表 44-1 検証行列の要素 m_{ef}

$G \setminus \bar{G}$	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_l	\bar{g}_k
g_1	m_{11}	m_{12}	m_{1l}	m_{1k}
g_2	m_{21}			
\vdots	\vdots			
g_e	m_{e1}		m_{el}	
\vdots	\vdots			
g_k	m_{k1}			m_{kk}

究での目的以外にデジタル解析による地表クラス分類結果（たとえば手法間の総合評価）に応用することもできる。

なお、あいまい度の尺度 $T(G, \bar{G})$ を求める資料となる頻度行列は、検証のために4.5で使用するため検証行列と呼ぶことにする。この検証行列の要素は表44-1の m_{ef} に相当するものである。

4.5 カラー合成写真判読法の適用結果とその考察

4.5.1 MSS画像による P_{MSS} 写真の2次元的分類結果とその考察

(1) 分析地区と地表クラス

カラー合成写真上の判読分析地区 $TEST-1$, $TEST-2$ はともに地上で約5.8 km^2 であり地物が類似した地域である。 $TEST-1$ は御坊市の市街地を含むため $TEST-2$ 地区よりも建造物が多い。しかし、建造物の多くは人家であり、その多くは縮尺の関係で個々に判読することは困難であった。したがって、人工構築物 (O) の対象となったものは校舎、ビル、寺院、道路、特に大きい人家および倉庫などである。

土壌 (S) は裸地、田畑の土壌を判読対象とした。植生は稲が他の植生と明確に分離できることから、緑色系植生 (Z) としてレタス畑、桑畑、休耕地の雑草および樹林を判読対象とした。黄色系植生としては稲 (R) のみである。水域 (W) は河川、沿岸水、湖を対象に入れた。

これらのことから分析地区の分類項目は基本分類項目、土壌、植生、人工構築物および水域の中で植生を2種に分け、その結果、稲 (R)、^{(土壌(S))} 緑色植生 (Z)、人工構築物 (O)、水域 (W) の5種を地表クラスと決定した。各分析地区の地表クラスの標本数は表45-1の通りである。

(2) 識別基準の作成と分類結果の考察

リアル、フォールスおよびシュードウのカラー合成写真上に散在する上記の地物に含まれる地物を判読して色調コード表によって式(43-1)のUを作成し計算機入力データとした。このUから点 E_{ij} の各地表クラスの頻度 n_{ijq} ($q = 1$: 稲, $q = 2$: 土壌, $q = 3$: 緑色植生, $q = 4$: 人工構築物, $q = 5$: 水域) とその総和 N_{ij} を求めた。その一部を付表4-1に示した。

この表4-1はリアル—フォールス(A)の結果であって、その識別基準 \bar{E} は図45-1に示してある。ただし、この識別基準 \bar{E} は式(43-11)を適用していない^{4.28)}結果である。

表45-1 P_{MSS} の地表クラス別標本数

地表クラス	TEST-1	TEST-2
R	186	129
S	85	172
Z	54	141
O	143	96
W	120	60
合 計	588	598

FALSE	FALSE
<p> .42440020004040 .00000000000000 .00000000000000 .00000000000000 R*00000000000030 E.00000000000000 A.22220020003230 L.4222200200222 .00035200003000 .00001000000000 .00000000000000 .0022002200333 .00000000000000 .3020000000335 </p>	<p> .04242020004440 .24442000003104 .04444000003024 .00442000000000 R*00305000003334 E.00000000000000 A.12220020003230 L.42220100201222 .00115110001000 .00223110001110 .00000000000000 .0022032200333 .00100000000000 .3023230000335 </p>
PSEUDO	PSEUDO
<p> .40200030000002 .22220000000000 .42222002202300 .40220002002302 F*00025000001000 A.00022000000000 L.20220032000220 S.00020000200000 E.00220000000000 .00000000000000 .00201000003000 .00220002000303 .40030000000333 .00220003000335 </p>	<p> .41200030000002 .42222000004040 .42222002204200 .42223002004003 F*0022000020231 A.00111000003033 L.20220032100220 S.00020000200000 E.00220000000000 .00000000000000 .41111000003333 .40201002003333 .42131300000333 .40221003004445 </p>
REAL	REAL
<p> .40000024000000 .20000023000000 .10000022000200 .40000022200203 P*00000021500000 S.00000000000000 E.00000003000300 U.00000020000203 D.00000000000200 O*00000000000000 .00000020010000 .00000030300303 .00000020000003 .00003022000305 </p>	<p> .444030004000002 .01240012000000 .22220022110200 .42400022110212 P*01255021510002 S.00000000030003 E.00000003000300 U.00000020000203 D.000000000100200 O*00000000020000 .44423023300002 .44403030100303 .00404022300003 .43303022010305 </p>

TEST-1 地区

TEST-2 地区

図45-1 n_{ijq} の識別基準 \bar{E}

FALSE	FALSE
<p> 11111111122222 12345678901234 11 44242000003400 12 22442000004103 13 02042000002024 14 00022000000000 E15 00305000003504 E16 00000000000000 A17 10200000001000 L18 01222100001004 19 00010110001000 20 00231100001110 21 00000000000000 22 00000000000000 23 00100000000000 24 00332300003230 </p>	<p> 11111111122222 12345678901234 11 10240000004000 12 00140000003000 13 00444000003000 14 00440000000000 R15 00000000000000 E16 00000000000000 A17 10220000001000 118 00223300001000 19 00311000003000 20 02032000001133 21 00000000000000 22 00000300000000 23 00000000000000 24 00002000000335 </p>
PSEUDO	PSEUDO
<p> 11111111122222 12345678901234 11 40220000000000 12 42210000004040 13 42220000004200 14 402100000000403 F15 00220000002231 A16 00111000002030 L17 00000000100000 S18 00000000000000 F19 00000000000000 20 00000000000000 21 40111000001333 22 20011000003001 23 02101300000333 24 40421000004345 </p>	<p> 11111111122222 12345678901234 11 11100000000000 12 00002000000000 13 42241000004030 14 42223000004100 F15 00012000020002 A16 00000000003003 L17 00000000000000 S18 00000000000000 F19 00000000000000 20 00000000000000 21 41011000003100 22 00001000000033 23 00000300000333 24 00202000000035 </p>
REAL	REAL
<p> 11111111122222 12345678901234 11 444030000000002 12 22200002000000 13 22220002110000 14 20200021110012 P15 01205001110003 S16 00000000000003 E17 00000000000000 U18 00000000000000 D19 00000001000000 O20 00000000000000 21 24423001030002 22 44403000220003 23 00404002300003 24 33301000010005 </p>	<p> 11111111122222 12345678901234 11 44000012000000 12 11040011000000 13 20040020020000 14 42400021010000 F15 00000013020002 S16 00000000300000 E17 00000000000000 U18 00000000000000 D19 00000000000000 O20 00000000200000 21 44400003300003 22 00000000130003 23 00000000300003 24 00000000203005 </p>

TEST-1 地区

TEST-2 地区

図45-2 n'_{ijk} による識別基準 \bar{E}'

つぎに、式(43-11)を適用して得られた識別基準 \bar{E}' を図45-2に示す。これらの識別基準 \bar{E} 、 \bar{E}' を用いて自己の分析地区の標本を分類した結果を度数で表示すると表45-2、表45-3となった。この表45-2, 3 から式(43-10), (43-9)で示した2種の抽出率を計算した結果を表45-4, 5にまとめた。これらの分類結果の中でTEST-1地区の土壌(S)と緑色系植生(Z)の抽出率が他の地表クラスの抽出率に比べ低率である、この原因の1つは土壌と緑色系植生の標

表45-2 識別基準 \bar{y} による見掛けの分類結果 $\sum q$

分析地区	TEST-1					TEST-2				
	g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	g ₅	g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	g ₅
画像クラス	g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	g ₅	g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	g ₅
(A)	149	11	4	2	0	166	18	8	3	0
(B)	5	24	2	0	3	34	27	121	5	17
(C)	2	4	21	1	0	28	3	1	98	0
	1	31	5	118	0	155	3	19	1	74
	27	12	22	22	117	200	0	13	29	0
	121	9	2	2	0	134	97	19	2	4
	6	40	2	6	0	54	26	110	7	3
	4	0	21	1	0	26	2	0	105	0
	0	20	14	130	0	164	3	16	1	74
	28	8	14	4	97	151	0	11	25	0
	152	16	2	1	0	171	66	28	2	0
	3	36	0	6	0	45	8	52	3	0
	2	2	23	8	0	35	3	12	125	0
	0	19	12	123	0	154	2	6	7	38
	28	11	16	4	120	179	0	0	0	0

表45-3 識別基準 \bar{y} による見掛けの分類結果 $\sum q$ (条件付き最大値法)

分析地区	TEST 1					TEST 2				
	g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	g ₅	g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	g ₅
画像クラス	g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	g ₅	g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	g ₅
(A)	140	9	2	0	0	151	96	18	8	3
(B)	7	39	2	18	3	69	27	121	5	17
(C)	2	4	23	3	0	32	3	1	98	0
	1	13	2	87	0	103	3	19	1	76
	0	0	0	0	20	20	0	13	29	0
	115	5	2	0	0	122	96	18	3	3
	12	44	0	10	0	66	26	110	7	3
	4	1	27	10	0	42	1	0	104	0
	0	13	7	111	0	131	4	32	2	89
	28	8	14	4	97	151	0	11	25	0
	143	10	2	0	0	155	67	29	2	0
	12	46	0	11	0	69	31	87	4	0
	2	3	33	20	0	58	3	0	53	0
	0	14	2	107	0	123	27	43	9	96
	28	10	15	4	117	174	0	12	72	0

表45-4 抽出率 r_p, r_q の値

地 表 ク ラ ス		R	S	Z	O	W
標 本	数	106	85	54	143	120
(A)	1p	80.1	28.2	38.9	82.5	97.5
	1q	89.2	40.0	51.9	108.4	166.7
(B)	1p	65.0	47.1	38.9	90.9	80.8
	1q	72.0	63.5	48.1	114.7	125.8
(C)	1p	81.7	42.4	42.6	86.0	100.0
	1q	91.9	52.9	64.8	107.7	149.2
標 本	数	129	172	141	96	60
(A)	1p	74.4	70.3	69.5	77.1	100.0
	1q	96.9	98.8	72.3	101.0	170.0
(B)	1p	75.2	64.0	74.5	77.1	100.0
	1q	94.6	84.9	75.9	97.9	160.0
(C)	1p	51.2	30.2	88.7	39.6	0.0
	1q	74.4	36.6	141.8	55.2	0.0

T E S T 1	

T E S T 2	

表45-5 抽出率 r_p, r_q の値 (条件付き最大値法)

地 表 ク ラ ス		R	S	Z	O	W
標 本	数	100	100	100	100	100
(A)	1p	75.3	45.9	42.6	60.8	16.7
	1q	81.2	81.2	59.3	72.0	16.7
(B)	1p	61.8	51.8	50.0	77.6	80.3
	1q	65.6	77.7	77.8	91.6	125.8
(C)	1p	76.9	54.1	61.1	74.8	97.5
	1q	83.3	81.2	107.4	86.0	145.0
標 本	数	100	100	100	100	100
(A)	1p	74.4	70.4	69.5	79.2	100.0
	1q	96.9	98.8	72.3	100.0	170.0
(B)	1p	74.4	64.0	73.8	92.7	100.0
	1q	93.0	84.9	74.5	132.3	160.0
(C)	1p	51.9	50.6	37.6	100.0	100.0
	1q	76.0	70.9	39.7	182.3	240.0

本数が稲 人工構造物、水域の標本数と比較して少ないことに基因していると考えられる。この原因による抽出率の低下を除く意味で表 45-4, 5 を作成し、これらからその効用を調べてみると、表 45-5 の土壌、緑色系植生の抽出率は(A), (B), (C)のいずれにおいても表 45-4 の抽出率より高くなっていることが解る。この結果から条件付き最大値法の識別基準には式(43-11)を適用した \bar{E}' を使用すべきだといえる。

表 45-6 地表クラスの高抽出を示す画像の組合せ

また、表 45-5 のリアル—フォールス、フォールス—シュドゥ、シュドゥ—リアルの 2 画像の組合せと地表クラスの抽出率を調べ、両地区

地表クラスの記号	R	S	Z	O	W
カラー合成写真の組合せ	(A)	(A)	(B)	(C)	(C)

の平均抽出率の高いものを選び出すと表 45-6 となる。この結果は地区の諸特性によって変動しているので表 45-6 は 1 つの目安としての意味しかないことに注意すべきである。また目的によって分類や抽出すべき対象が異なるから分類のための最適なカラー合成写真の 2 種の組合せが、(A), (B), (C)のいずれであるかをただ 1 つに限定することは困難といえよう。

なお、ある色調コード

表 45-7 共通識別基準による分類結果

座標点 E_{ij} が分析地区

TEST-1, TEST-2 の両者ともに同一地表クラスと指定される場合には、その点は信頼性の高いことを示している。そこで両地区の条件付き最大値法の識別基準が共通な E_{ij} のみを取り出し、これを共通識別基準 \bar{E}_0 とし両地区の標本を分類した結

	地 表 ク ラ ス	標 本 数	R	S	Z	O	W
			186	85	54	143	120
T E S T 1	(A)	r _p	31.7	25.9	18.5	16.1	0
		r _q	32.8	49.4	20.4	18.9	0
	(B)	r _p	33.9	20.0	14.8	37.8	80.8
		r _q	34.9	29.4	16.7	46.9	125.8
	(C)	r _p	17.2	7.1	42.6	63.6	80.8
		r _q	18.3	14.1	81.5	74.1	127.5
T E S T 2	(A)	r _p	41.1	41.3	53.2	74.0	0
		r _q	46.5	58.3	53.2	97.9	0
	(B)	r _p	16.3	30.2	53.2	68.8	100.0
		r _q	17.1	36.6	53.2	102.1	160.0
	(C)	r _p	10.9	15.7	24.1	84.4	100.0
		r _q	13.2	17.4	24.1	153.4	240.0

果、表 45-7 となった。この表 45-7 の見掛けおよび真の抽出率は低いけれども、誤抽出率がほとんどなくなることになる。

つぎに表 45-5 の $100 - r_p$ は 2 次元空間法の識別基準の作成法による誤分類率を示しており、 $100 - r_q$ は見掛け上の誤分類率となる。この 2 次元空間法を実際の調査地区に適用するときには、カラー合成写真によって U の色調コードは作成できるが、それに対応する地物の名称や特性などの詳細が明らかでないことが多い。そのため色調コードと地物が対応していない

ため r_p は未知であり、 r_q による評価しかなしえない。そこで表45-5の(A) (B) (C)の r_q を平均した見掛けの誤分類率を求めて、これによって簡単にこの手法の適用結果を評価することが考えられる。ただし、抽出率が100%を超えるものもあるし、表45-5の抽出率は表45-3の分類結果の対角行列のみしか示していないことに注意を要する。

しかし、ここでは表45-2, 3に全部記載してあるので、対角行列以外のすべてがわかる。

(3) あいまい度の尺度による考察

条件付き最大値法による識別基準によって分類された結果(たとえば表45-5)は N_j の標本が識別基準 \bar{E} によって分類されたわけである。あいまい度の尺度を求めるための検証行列の要素 m_{ef} は各地表クラスの標本 N_1, N_2, \dots, N_5 (図43-1参照)が識別基準 \bar{E} によっていかなる地表クラスに割り当てられるかということである。したがって、検証行列を求めるにはリアル—フォールス(A)を例

に上げると図45-2の識別基準 \bar{E} を用いて、付表4-1の N_1, N_2, \dots, N_5 を分類すればよい。こうして分析地区 TEST-1, TEST-2の(A) (B) (C)について求めた頻度行列(検証行列も含んで表示されている)を表45-8

表45-8 条件付き最大値法の送信結果(頻度行列)

分析地区 画像クラス	TEST 1							TEST 2						
	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	N_g	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	N_g
A	\bar{g}_1	140	7	2	1	0	36	186	73	10	0	45	0	129
	\bar{g}_2	9	39	4	13	0	20	85	41	71	0	36	0	172
	\bar{g}_3	2	2	23	2	0	25	54	14	12	75	7	0	141
	\bar{g}_4	0	18	3	87	0	35	143	0	19	1	74	0	96
	\bar{g}_5	0	3	0	0	20	97	120	0	0	0	0	0	60
B	\bar{g}_1	115	12	4	0	28	27	186	22	14	1	32	0	129
	\bar{g}_2	5	44	1	13	8	14	85	16	56	0	43	11	172
	\bar{g}_3	2	0	27	7	14	4	54	17	4	75	10	25	141
	\bar{g}_4	0	10	10	111	4	8	143	1	4	0	69	0	96
	\bar{g}_5	0	0	0	0	97	23	120	0	0	0	0	60	60
C	\bar{g}_1	143	12	2	0	28	1	186	40	29	1	25	0	129
	\bar{g}_2	10	46	3	14	10	2	85	43	50	6	39	12	172
	\bar{g}_3	2	0	33	2	15	2	54	15	3	35	8	72	141
	\bar{g}_4	0	11	20	107	4	1	143	0	14	0	81	0	96
	\bar{g}_5	0	0	0	0	117	3	120	0	0	0	0	60	60

注) \bar{g}_6 は識別基準の対象にならなかったクラスである。

に示す。この結果を用いて式(44-9)からあい

まい度の尺度 $T(G, \bar{G})$ を求め、識別基準の評価ならびに誤分類の評価の適用性を調べてみる。

表45-8から2地区の(A), (B), (C)における $T(G, \bar{G})$ を求めたところ表45-9の結果をえることができた。この表から $1 - T(G, \bar{G})$ は2次元的空间分類における識別基準を用いたと

表45-9 P_{MSS} 写真の2次元分類のあいまい度の尺度値

画像の組合せ	TEST 1	TEST 2
Ta リアル—フォールス	0.6066	0.3406
Tb フォールス—シュドゥ	0.5434	0.4272
Tc シュドゥ—リアル	0.5538	0.3615
Ta' リアル—フォールス	0.2771	0.3450
Tb' フォールス—シュドゥ	0.2784	0.4296
Tc' シュドゥ—リアル	0.4460	0.3694

きの誤分類によって生じた値であると解釈され、その値はTEST-1地区で(A), (B), (C)の平均値として $1 - T = 0.4321$, TEST-2地区で $1 - T = 0.6236$ となる。この結果は表45-5の

抽出率の傾向と矛盾していない。

ここで、識別基準の変更（1つの識別基準の他地区への適用）などを行なった場合に、どのような差異が生じるかを調べてみる。表45-9に示したあいまい度の尺度 T'_a, T'_b, T'_c の値は条件付き最大値法によって決定された識別基準 \bar{E}' を両分析地区で交換して分類を試みた結果である。この結果から T'_a, T'_b, T'_c のいずれも $TEST-2$ が $TEST-1$ より高い値を示している。このことは $TEST-1$ の識別基準が $TEST-2$ の識別基準より正確であることに基因するものである。これは $TEST-1$ の T'_a, T'_b, T'_c が T_A, T_B, T_C より極度に値が低いことから予想されたことである。

以上の事項からあいまい度の尺度 $T(G, \bar{G})$ は検証地区などの分類結果の評価尺度として実用性があると考えてよい。

また、表45-9の T_A, T_B, T_C を分析地区内でその差異を調べると0.06程度しかなく T_A と T'_a の差の割合から考えて、カラー合成写真の2種の組合せに対する効用は同程度といえ、リアル、フォールス、シュードゥの3種のカラー合成写真は同程度に地物分類に重要といえよう。

つぎに、2次元分類法による抽出率は r_q として得られるが、 r_p は未知のため真の抽出率を求めることは一般に困難である。本実験ではグラントウルースデータを都市計画図に記入したため、地物の色調コード U と地表クラスが対応づけられていた。したがって、 r_p を求めることができ見掛けの抽出率 r_q に含まれる誤分類率を $r_q - r_p$ として得ることができ(A)、(B)、(C)を平均して $TEST-1$ では約22.9%， $TEST-2$ では約24.6%であることが明らかにできた。

4.5.2 P_{MSS}, P_{CCT} 写真の3次元的空間分類の結果とその考察

空間的分類法に適用するデータは P_{MSS} 写真の場合は2次元的空間分類に用いた表45-1の標本であり、 P_{CCT} 写真の場合は表45-10に地表クラスの標本数を示す。これらの標本のデータ U を用いて空間的格子領域 E_{hij} (h :リアルカラー合成写真, i :フォールスカラー合成写真, j :シュードゥカラー合成写真)の頻度分布 n_{hijq} を全地表クラスについて計算し、地表クラスが等出現確率となると仮定した識別基準 \bar{E}'' を決定する。この識別基準 \bar{E}'' から通信路行列の各要素を頻度で表現した資料を、4.3.1(2)に記述した手順で求めた。この資料から通信路行列を算出し、式(44-9)を適用して、あいまい度の尺度 $T(G, \bar{G})$ を求めた。この結果を表45-11, 12に示した。さらに、 P_{MSS} 写真判読の色調コード U を用いて、2次元的空間分類における

表45-10 P_{CCT} の地表クラスの標本数

分析地区 地表クラス	TEST 1
R	50
S	31
Z	54
O	61
W	60

表 45 - 11 P_{MSS} 空間的分類の検証行列の要素

	TEST 1						TEST 2					
	\bar{G}_1	\bar{G}_2	\bar{G}_3	\bar{G}_4	\bar{G}_5	N_g	\bar{G}_1	\bar{G}_2	\bar{G}_3	\bar{G}_4	\bar{G}_5	N_g
G_1	151	4	6	0	25	186	100	24	2	3	0	129
G_2	7	53	1	15	9	85	18	117	0	26	11	172
G_3	0	0	35	15	13	64	2	4	110	1	24	141
G_4	0	5	8	126	4	143	3	0	0	93	0	96
G_5	0	0	0	0	120	120	0	0	0	0	60	60

表45-9の T'_a , T'_b , T'_c に相当するところの

識別基準の交換による空間的分類法をTEST-1, TEST-2の両地区において実施した。

これらをまとめて表45-13に $T(G, \bar{G})$ を示す。この表の中でTEST-2の T_{CCT} が空欄となっているのは、資料が入手しえなかったことに基因する。

表 45 - 12 P_{CCT} 写真の空間的分類の検証行列の要素

	\bar{G}_1	\bar{G}_2	\bar{G}_3	\bar{G}_4	\bar{G}_5	N_g
G_1	50	0	0	0	0	50
G_2	0	31	0	0	0	31
G_3	0	4	50	0	0	54
G_4	0	3	0	58	0	61
G_5	0	0	0	0	60	60

空間的分類の $T(G, \bar{G})$ を P_{MSS} 写真につい

表 45 - 13 空間的分類法によるあいまい度の尺度 $T(G, \bar{G})$

カラー合成写真の種類	P_{MSS} 写 真		P_{CCT} 写 真
分 析 地 区	TEST 1	TEST 2	TEST 1
自己の識別基準	$T_{11} = 0.6323$	$T_{22} = 0.6223$	$T_{CCT} = 0.9356$
識別基準の交換	$T_{21} = 0.4749$	$T_{12} = 0.5184$	

で両地区で比較すると^{2次元}平面的分類より差異は少なく、かなり安定してきている。また、識別基準を交換した場合は自己の識別基準を用いたときよりTEST-1で0.15, TEST-2で0.10程度の低下がみられる。この低下量は^{2次元}平面的分類のそれに比べて少ないといえよう。

つぎに、 P_{MSS} 写真と P_{CCT} 写真の $T(G, \bar{G})$ を比較すると P_{CCT} 写真の方が約0.3高い。このことは判読方法と分類方法が同程度と考えれば写真の画質に基因しているといえよう。ただし、 P_{MSS} 写真と P_{CCT} 写真は使用チャンネルが多少異なるため、この要素も加味する必要がある。

図45-3は写真の種類、分類手法の相違を横軸方向に、縦軸方向に $T(G, \bar{G})$ を定め、各 $T(G, \bar{G})$ をプロットしたものである。この図から $T(G, \bar{G})$ を適用することによって分類条件やデータの評価が行なれることが上述の結果から実証できたと考える。

4.6 結 語

本章で述べてきた方法は、航空機によるMSSデータからカラー合成写真を作成して分析地区の地表パターンを判読し、判読された個々のパターンの色調を観察し、コード化し、地物分類用の識別基準を作成すること、ならびに地物分類することであった。この色調コード空間による地物分類法は単に基本的分類項目である地表クラス（土壌、植生、人工構築物、水域）のおおのがどの程度判読でき、さらに地表クラスを細分化でき、しかもその地表クラスの抽出率を簡易で迅速に求めるという目的だけでなく、地物の色調のコード化をする過程において分析地区の各パターンの構成や地表クラスの色調の差異などを理解し、分析地区の雲の影による分析困難な位置の指摘をすることなども目的であった。

そこでカラー合成写真の判読法によって上記の目的が達成できるかを検査するために実験データの適用を試みてきた。これらの結果から得られた成果をまとめると下記の事項に要約できる。

(1) カラー合成写真上のパターンを判読し、色調差による地物を観察した経験から得られたことは、分析地区の雲の影の部分がフォールスカラーとシュドゥカラーから指摘でき、その分布性はフォールスカラー合成写真から抽出できる。また、フォールスカラー合成写真を P_{MSS} と P_{CCT} と比較すると、 P_{MSS} では判読できなかった雲の影の部分を P_{CCT} で捕えることができた。図43-3に示した白色部分はデジタル解析の分析地区を選定するためきわめて重要な資料と考えられ、 P_{MSS} 写真から直接デジタル解析に入ることの危険性を示したといえる。

(2) P_{MSS} 写真は P_{CCT} 写真よりデータ処理過程が簡単で低廉で迅速に作成することができる。しかし、詳細な地物や雲の影響を調べるには不適當で P_{CCT} 写真を用いるべきであろう。したがって、 P_{MSS} 写真は分析地区の概要を知り、CCTを作成する必要性を判断するのに使用するのも1つの利用法と考えられる。

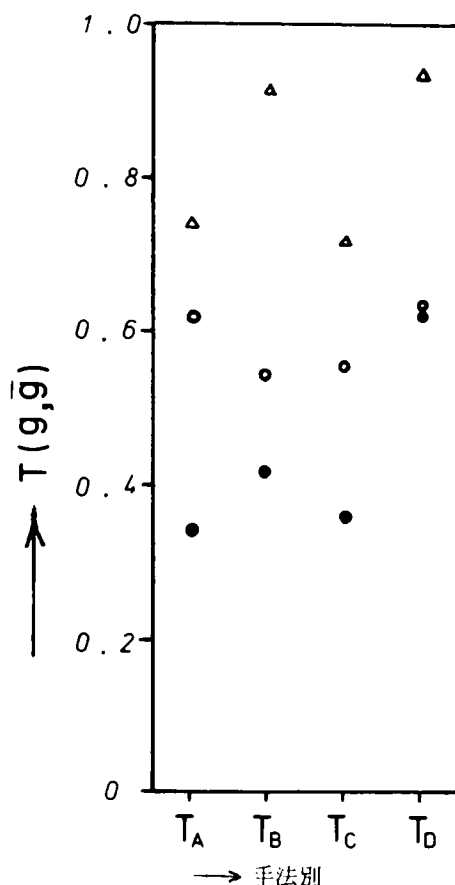


図45-3 手別法によるあいまい度の尺度 $T(G, \bar{G})$ の分布

(3) カラー合成写真を作成する際のフィルター選定は4.2で述べたごとくB,G,Rが基本と考えられる。しかしながら、特定の対象物を判読容易にするには、B,G,R以外に数多くのフィルターがあり、判読対象物の種類とフィルターの種類との関係などの研究は今後の課題といえよう。

(4) 2次元空間分類法は3次元空間分類法より精度が劣ることは確かであるが、地物分類に対して条件付き最大値法の識別基準を用いれば、すでに示した抽出率やあいまい度の尺度の値からわかるようになりよい分類結果を得ており、3次元空間分類法の代用としても実用性があると思われる。また、2次元空間分類法によってリアル、フォールスおよびシュドゥカラー合成写真 P_{MSS} が本章の分析地区では地物分類の効用に差のないことが明らかになった。

(5) P_{MSS} 写真の2種類の組合せの中から分類項目に適したものを示せば、稲、土壌はリアル—フォールス(A)、緑色系植生はフォールス—シュドゥ(B)、人工構築物および水域はシュドゥ—リアル(C)となった。しかし、各抽出率のバラツキから判断して一般性に欠ける恐れがある。

(6) 2次元空間分類法の実験から見掛けの抽出率に含まれる誤分類率を $r_q - r_p$ として求めることができ、通常の分析では r_q しか得られないので、参考資料として重要と考える。 $r_q - r_p$ はTEST-1地区で約23%、TEST-2地区で約25%であった。

(7) 2次元分類結果とそのあいまい度の尺度から、3種のカラー合成写真の地物分類の効用を調べたところ、FMテープから作成した P_{MSS} 写真のあいまい度の尺度 T_A, T_B, T_C はほぼ同一値を示し、CCTから作成した P_{CCT} 写真では T_B が T_A, T_C に比べ高い値を示した。この傾向は T_A, T_C にリアルカラー合成写真の判読結果が含まれていることに基因すると考えてよい。このことは P_{MSS} 写真に現われていないことから写真作成上生じたものでデータ自身に原因があるものではない。また、あいまい度の尺度による評価によって上記の検討を可能にできた。

(8) 4.3.1で説明した条件付き最大値法による識別基準 \bar{E} を用いて3次元空間分類法を実施し、あいまい度の尺度 $T(G, \bar{G})$ によって P_{MSS} 写真と P_{CCT} 写真の分類評価を行なったところ分析地区TEST-1において、 $T_{MSS} = 0.63$ 、 $T_{CCT} = 0.94$ となった。この結果は写真45-2~4、写真49-9~11の画像で3次元色調コード空間による分類をして、その分類項目が稲、土壌、緑色系植生、人工構築物および水域の5種類としたときの評価尺度である。この条件下で判読方法、分類法、分類項目が同じであると考えられるので T_{MSS} と T_{CCT} の差は画像差に基因しているといえよう。

また、これらのことから判読・分類の諸条件あるいは原資料や処理過程での資料作成条件の相違をあいまい度の尺度によって評価できると考える。

(9) 3次元分類法は一定の信頼性を基準として分類を行なうものではない。したがって、当

初から結果の信頼性を予測することは困難である。その代りに、色調コード空間における地物の出現確率の分布形態を正規分布と仮定する必要がないという特徴がある。ただし、色調コード空間による分類はデータ処理時に多大の記憶容量を必要とするため、色調コード空間の領域が小さい場合に適用すると効果的と思われる。

QO) 本章のカラー合成写真 P_{MSS} は MSS 画像を用いているが、マルチバンド写真にも応用することができる。

参 考 文 献

- 4.1) 松野久也：“写真地質,” 実業公報社, 1965. 3, p.1 ~ 2.
- 4.2) 中島 巖：“森林航測概要,” 地球出版社, 1966. 1, p.7 ~ 10.
- 4.3) 堀江友義：“林業と航空写真（一）,” 測量, Vol. 3, No.12, 1953. 12, p.6 ~ 8.
- 4.4) 十時永喜：“航空写真による地質構造解析の一考察,” 測量, Vol.10, No.6, 1960. 6, p.7 ~ 10.
- 4.5) 森 博：“航空写真解析による土質調査,” 測量, Vol.6, No.5, 1956. 5, p.21 ~ 23.
- 4.6) R. Pestrong: 'Multiband Photos for a Tidal Marsh', Photogrammetric Engineering, Vol.35, No.5, 1969. 5, p.453 ~ 470.
- 4.7) R. G. Musgrove: 'Photometry for Interpretation', Vol. 35, No.10, Photogrammetric Engineering, 1969. 10, p.1015 ~ 1023.
- 4.8) R. Webster, I. F. T. Wong: 'A Numerical Procedure for Testing Soil Boundaries Interpreted from Air Photographs', Photogrammetria, Vol. 24, No.1, 1969, p.59 ~ 72.
- 4.9) 星 仰：“地図濃淡のデジタル化による道路分布測定法とその応用,” 測量, Vol.21, No.10, 1971, p.14 ~ 18.
- 4.10) 鳥脇純一郎：“雑音をともなう2次元図形の境界の一識別法,” 電子通信学会論文誌, Vol. 51-C, No.2, 1968. 2, p.43 ~ 50.
- 4.11) 森忠次・星 仰：“写真濃度の図形表示方法とその応用,” 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 1972. 5, p. N 14-1 ~ 2.
- 4.12) 星 仰：“濃度測定による色彩地図の面積々算法,” 土木学会年次学術講演会講演概要集 IV, 1970. 10, p.213 ~ 214.
- 4.13) 星 仰, 川口雅人：“被写体とフィルムベースの色調関係について,” 土木学会関西支部年

- 次学術講演会講演概要集, 1975. 5, p.IV 20 - 1 ~ 2.
- 4.14) A. S. P. : "Manual of Photographic Interpretation," American Society of Photogrammetry, 1968, p.81 ~ 84.
- 4.15) 西尾元充 ; “天然航空写真の理論と実際(1),” 測量, Vol. 9, No.7, 1959. 7, p.11 ~ 15.
- 4.16) 星 仰 ; “連続階調分解ネガ写真による一部の色調パターン認識,” 写真測量, Vol.10, No.4, 1972, p.1 ~ 6.
- 4.17) 森忠次, 星 仰 ; “土地利用図の色調のパターン認識,” 写真測量, Vol.11, No.4, 1973. 3, p.1 ~ 12.
- 4.18) 地理院地図管理部 : “画像技術ニュース,” 地理時報, No.48, 1976. 3, p.21.
- 4.19) 安田嘉純, 村上隆, 飯坂譲二 ; “カラー写真画像の補正,” 計測自動制御学会リモートセンシングシンポジウム資料, 1975. 11, p.51 ~ 54.
- 4.20) E. F. Yost, S. Wenderoth ; "Multispectral Color Aerial Photography," Photogrammetric Engineering, Vol. 33, No.9, 1967, p.1020 ~ 1033.
- 4.21) 星 仰 ; “M S S画像による地物調査について,” 土木学会年次学術講演会講演概要集 IV, 1975. 10, p.350 ~ 351.
- 4.22) 星 仰 ; “カラー合成写真による2地区の判読差,” 計測自動制御学会リモートセンシングシンポジウム資料, 1975. 11, p.56 ~ 57.
- 4.23) 星 仰, 杉若武 ; “航空機によるM S S画像の定性的パターン分類法 — 合成写真の色調による地物分類 —,” 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 1976. 5, p.Ⅳ44 - 1 ~ 2.
- 4.24) 星 仰 ; “合成写真による地表パターンの分類の一方法,” 日本国土海洋総合学術診断報告書, 1977. 3, p.309 ~ 314.
- 4.25) 星 仰 ; “識別領域による合成写真の地表パターン調査の基礎研究,” 写真測量とリモートセンシング, Vol. 14, No.3, 1976. 5, p.19 ~ 27.
- 4.26) 三根久 ; “情報処理入門,” 朝倉書店, 1968. 4, p.43 ~ 57.
- 4.27) 星 仰, 鳥井清司(他) ; “リモートセンシングデータのディジタル解析システム(I)” 計測自動制御学会リモートセンシングシンポジウム資料, 1977. 11, p.33 ~ 34.
- 4.28) 前出 4.26) p.23.

第5章 CCCTデータの処理システムと地物判定

5.1 概 説

リモートセンシングのデジタル解析用データ処理システムを用いて地物などの判定を1画素単位で分類する方法はパデュー大学やミシガン大学などで1960年代より研究が進められてきている。特にパデュー大学の開発したLARSYSはリモートセンシングのデータ処理システムとして代表的なものであり、わが国にも1976年頭初導入され、1976年5月ユーザに開放された。このシステムを利用した実験例としては北海道の土壤図の作成^{5.2)}、滋賀の土地条件図の作成^{5.3)}の基礎研究などがある。

わが国のリモートセンシングのデータ処理システムは現在、大学・研究所・企業などで作成中で、LARSYSにないシステムの拡充や処理過程の改良もなされている。このことは、テキスト解析の導入^{5.4)}、チャンネルデータ以外の変数の付加^{5.5)}および処理過程の改良と分類結果の評価法^{5.6)}などに見受けられる。

いま、MSSデータの処理システムの改良の問題を研究の目的としてもMSSデータの利用目的が明示されないと詳細なシステム分析をすることはできない。そこで、土木工学分野などにおける土木事業計画地域の現状調査、地物の配置状態の調査、土地利用現状の図示などにMSSデータを応用することを目的として、LARSYSなどの教師付き分類手法の処理過程の適用性について考察した。この結果、都市域のデータ処理過程において下記の事項について研究する必要性を見出した。

- i) 分析地区が都市およびその近郊になると、トレーニング地区の切り出しが困難となり、トレーニング地区の資料の質を検討する処理過程の必要性。
- ii) 目的とする地物の分類項目と識別の容易な地物特性とを比較検討する処理過程の必要性。
- iii) 分類結果を総合して評価する方法とその論理の必要性。

これらの問題点を解決するために、航空機によるMSSデータの教師付き分類処理システムの一方法として、USAS手法^{注)}を開発したのでその概要を述べ、USAS手法の処理段階1,2の効用を明らかにするために、第4章で定義したあいまい度の尺度を分類結果に適用して、USAS手法の実用性を実験データの適用結果によって実証する。

注) Unsupervised and Supervised Method の略号で、トレーニング地区切り出し用資料作成に教師なし分類法を使用し、トレーニング地区切り出し後は教師付分類法を適用する方法である。

なお、本章の実験に用いるデータはCCCTに保管されているものである。また、分類結果の検討にはカラーディスプレイ出力^{5.7)}を用いた方が迅速性、処理の省力化などの点においてすぐれているが、分析地区内の地物を実験的に検討する場合の都合と汎用性を重視してラインプリンタ出力を採用している。

5.2 USAS手法によるデータ処理システム

(1) USAS手法の目的

USAS手法の目的は第1に分析地区が都市域のごとく複雑なために、LARSYSなどで用いるLP出力のグレースケールマップやカラーディスプレイ表示によるチャンネル別放射・反射分光輝度分布曲線ではトレーニング地区の選択が容易でないで、これらの改善にある。この理由は、

- i) 地物を鑑定する最良のチャンネル演算式が不明な場合。
- ii) グレースケールのレベル指定が不適切な場合。
- iii) 各パターンの一様性が保証されず、画素内に小領域パターンを複数含んでいるため、表示されたパターンが実際のパターンと異なる場合。
- iv) 上述のi)～iii)の条件が組合わさった場合。

注)
などではトレーニング地区^{注)}の切り出しが不正確になりがちで空中写真や地図上の位置をグレースケールマップ上に示すのに長時間を要するからである。

第2の目的はトレーニング地区の指定分類項目の適性評価を可能にすることである。この理由は分析者などが決定した地表クラスの位置とその種類が分類項目として適しているかを検証する機構がLARSYSにはなく作為抽出(トレーニング地区)の検証法が確立されていないためである。また、トレーニング地区のデータを正確に把握するにはデジタル量では不十分でアナログ的表現である図形表示による検証が重要と思われる。このためにUSAS手法ではトレーニング地区のデータやクラスターのデータの視覚判断をする過程で図形処理を利用することにする。

(2) USAS手法の処理手順(第1段階)

MSSのデータ(CCCT使用)のUSAS手法の処理過程をここでは2段階に分けて説明する。最初の第1段階の処理手順は図52-1に示すごとく、CCCTのテープ点検に始まり、データの

注) 分析地区を調査して、必要な分類項目別に地表のものを分ける場合に、分類項目別の統計量を計算機に与えておく必要がある。この統計量を作るために分類項目に該当する地物を分析地区内から1分類項目に対して1ヶ所以上選定する。この選定された場所を総称して、トレーニング地区と呼んでいる。

点検，分析地区を決定するためのチャンネル別グレースマップの作成を含む。

つぎに，分析地区の全部もしくはその一部の地区（サブ分析地区と呼ぶことにする）から乱数を用いて標本抽出を行なう。この理由は標本数が多いとクラスタ分析に長時間を要し，記憶容量の制限を受けるからである。この標本は分析地区の画素データから類似したクラスタを見出すためにのみ使用する。ここで定められるクラスタはクラスタ間距離によって決定されるものである。このクラスタ内の画素データのバラツキ状態を調べるために，各画素のチャンネルデータをクラスタ別に放射・反射分光輝度分布曲線や5.5.2で述べる放射状ダイヤグラムで表示し，この図面からクラスタ数の適性を調べる。もし，クラスタ数が不適当なら図52-1の(i)を繰返し処理する。そして，最終的に決定されたクラスタ

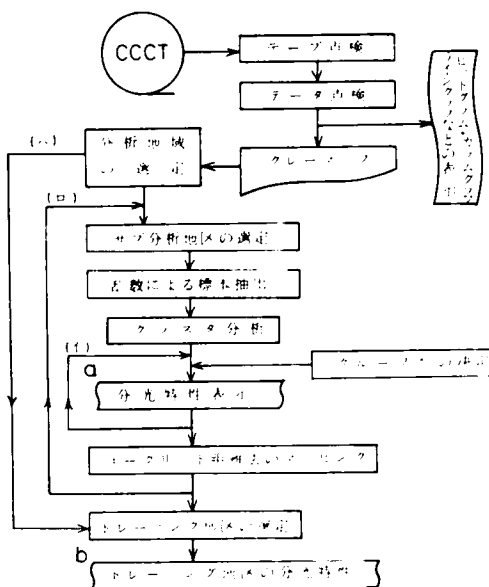


図 52-1 USAS 手法の第 1 段階の処理

ごとにチャンネル別放射輝度の平均値を求め，ユークリッド距離法で分析地区を 1 画素づついずれかのクラスタに割当てて。割り当てられた分析地区の画素はクラスタの表示記号によって表わしグレースマップを作成する。この分類結果は分光特性のみを考慮して作成したものであるから，4.1 で示した色分解のデータを合成した図面に近いものが得られることになる。もし，クラスタ数が不十分なら図52-1(ii)を繰返す必要がある。

上記グレースマップはトレーニング地区を選定する図面として使用する。グレースマップ上に指定するトレーニング地区は分析者の経験的判断によるもので作為抽出といえる。分類項目に相当すると思われる場所をグレースマップ上に決定することは分類項目が分光特性から求めたクラスタの一部もしくはその結合で表現できることが前提である。この前提が成立するかどうかを判断するためには，クラスタとトレーニング地区の分類項目との対比処理過程を設ける必要がある。この処理過程を以下に述べる U S A S 手法の第 2 段階で行なう。

なお，クラスタと分類項目の対比資料は，付図 5-5 などの分光曲線の図面である。

(3) U S A S 手法の処理手順（第 2 段階）

従来の教師付き分類手法を実施するに当り，トレーニング地区の切り出し資料に教師なし分類

結果を利用した例はある。また、クラスと分類項目の対比をした例もあるが、クラスを構成する画素データの類似性を検討し、分類項目が分析地区に対して適応するかを検討する過程を処理システム内に取り入れたものは見当らなかった。そこでUSAS手法の第2段階では第1段階で得られた各クラスと各分類項目の分光曲線を比較し、クラスに対応する分類項目を取り出し、これらの対応表から分類項目の増減の必要性を検討する。この検討によって最終的な修正分類項目（以下地表クラスと呼ぶことにする）を決定する（図52-2参照）。

つぎに、各地表クラス間の有効なチャンネルを多変量解析の説明変数選択法を用いて行なう。この結果を比較検討したあとで分類用のチャンネル選択を行なう。

ここで、分類すべき項目と使用するチャンネルが決定されたので、地表クラスの分類予測をするために、

5.5.2で示す星座グラフ、4軸法による散布図、非線形な拡大散布図を用いて、トレーニングデータの

地表クラス内およびクラス間のバラツキと分離性を調べ分類手法の適用性を考察する。地表クラスごとのデータを調べたところ、正規分布から離れているものが非常に多いのでクラス間の分離性を調べるのにSwainらによる分離度^{5,8)}を用いなかった。

これらの図形処理結果^{5,9)}から地表クラスごとに分離可能であると判断されたとき、地表クラス別の統計量（標準偏差、分散共分散行列、相関係数など）を計算する。これらの値は分類に用いる教師となるものである。この教師によってトレーニング地区のデータの分類を試み、各地表クラスごとの抽出率を求めておく。これらによって分析地区全体を分類したときの精度の概略を推定することができる。

以下、分類手法を選択して分析地区の分類図を作成し、分類結果を調べるために検証地区（以下テスト地区^{注)}と呼ぶ）を選定しておき、テスト地区の分類結果を求め、4.4で論述したあいまい度の尺度により分類結果の評価を行なう。

以上がUSAS手法の手順の概略である。これらの手順の中の主要事項について実験データを

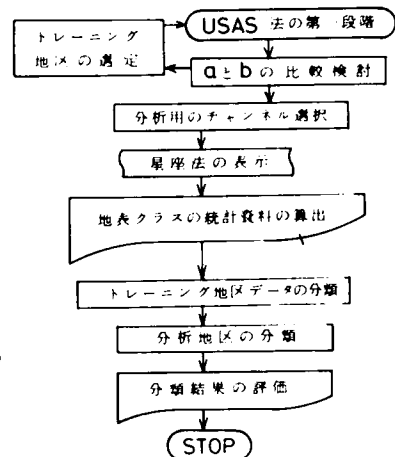


図 52-2 USAS 手法の
第 2 段階の処理

注) このテスト地区は分析地区の全地区を対象にするのが最良であるが、一般に分析地区の地物はごく一部しか判明していない。そこで、地物の既知な場所をテスト地区として選定しこのテスト地区の分類結果で分析地区の分類結果の代用とするのである。

適用しながら述べる。

5.3 CCCTの作成とデータ点検

5.3.1 CCCTの作成手順

MSS情報を保管しているFMテープを用いてCCTなる磁気テープにデータがデジタル量として変換され、そして保管される。このCCTに保管されているデータは補正がなされていない。そこでデータ分析をより正確にする意味で飛行条件として補正可能なラジオメトリック補正、チャンネル調整、走査のオーバーラップ除去およびクラッピングの補正などを実施してCCCTを作成する。本節ではこのCCCTを分析用データとして使用するためCCTからCCCTに変換する補正項目とその関係式の概略を示す。^{5.10)}

CCCTの作成手順は図53-1に示す順序であり、ラジオメトリック補正では表42-1のチャンネル番号1～10について式(53-1)を、チャンネル番号11について式(53-2)を適用する。

$$V = \alpha G \cdot R \cdot E + KV_{OFF} \quad \dots\dots\dots (53-1)$$

$$V = \alpha C + KV_{OFF} \quad \dots\dots\dots (53-2)$$

ただし、 V ；電圧、 G ；ゲイン値、 R ；レスポンス値、 V_{OFF} ； $E=0$ の時の V 値、 α 、 K ；変換定数である。

つぎに、チャンネル間のずれの調整ではCCT上の6チャンネルのデータの中で基準より速いものを A_{max} 、遅いものを A_{min} とすると各チャンネルずれの調整量 M_i は式(53-3)となる。

$$M_i = A_i - A_{min} \quad \dots\dots\dots (53-3)$$

一方、走査方向のオーバーラップの補正方法は走査幅 $2W_X$ と走査線の1回転する間に航空機が進行方向に移動した距離 ΔX の比によってオーバーラップ係数 n を式(53-4)より求めることができ、この K によってオーバーラップ量を近似的に取り除くことができる。

$$n = 2W_X / \Delta X \quad \dots\dots\dots (53-4)$$

つぎに、クラッピングは主に横風の影響によるもので飛行方向に対して、ヘッドアングル α (反時計回りを正とする)を生じる現象をいう。このヘッドアングルの発生によりデータ収集位置のずれを生じる。このずれ量は式(53-5)で求められる。ただし、 h は対地高度、 θ は走査角である。

$$dx_i = h \tan \theta \cdot \sin \alpha \cos \alpha / \Delta X \quad \dots\dots\dots (53-5)$$

以上の項目の補正を行って作成されたCCCTのデータフォーマットは第3章に示した通りである。

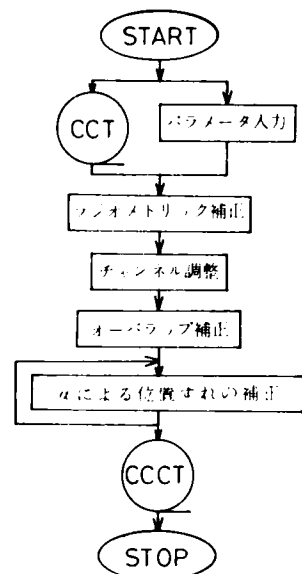


図53-1 CCCT作成手順の流れ

5.3.2 CCCTのデータ点検

CCCTのデータ点検はデータ自体の適応性を調査するとともに規定のデータ構成^{5.11)}にデータが保管されているかを検照することが目的である。すでに表82-2に示したごとくテープ点検として、1レコードのバイト数とテープマークの位置を調べ規定のものであることを確認する。つぎに、チャンネルデータの点検として16進ダンプ(付表5-1)と10進ダンプ(付表5-2)、ライングラフ(付表5-3-1)^{5.12)}、カラムグラフ(付表5-3-2)を分析地区の一部につき作成し、データ圧縮によるチャンネル別グレースマップ(付図5-1)^{5.13)}を作成する。これらの資料によってデータ点検が完了するので、図53-2に示す分析地区の指定をカラムとライン(分析地区の矩形の4角)で行なう。この4点の座標位置によって分析地区が決定され

たので各チャンネル別のグレースマップを再度作成する。このグレースマップを作成するための入力データはライン・カラムの範囲指定と、これらのスキップ量、チャンネル番号、チャンネルデータのレベル数とそのレベル区間および各レベルの文字指定である。

レベル数を増すことは放射輝度の詳細な区分に役立つ反面、分析地区の境界が把握しにくい性質を有しているため、一般には初回10レベル程度の等間隔レベルのグレースマップを作成し、つぎに詳細な分析区域を対象に、限定されたレベル間隔を細分割してグレースマップを作成する方法が効率的である(通常これを閾値処理と呼んでいる)。上記10レベル表示によるグレースマップとしては表53-1に示すレベル間隔と出力文字選定が、多くの実験結果からグレースマップ上の地物パターンを捕えやすく、しかも視覚効果があると思われた。この表53-1をチャンネル1,3,5,7,9,11に適用し

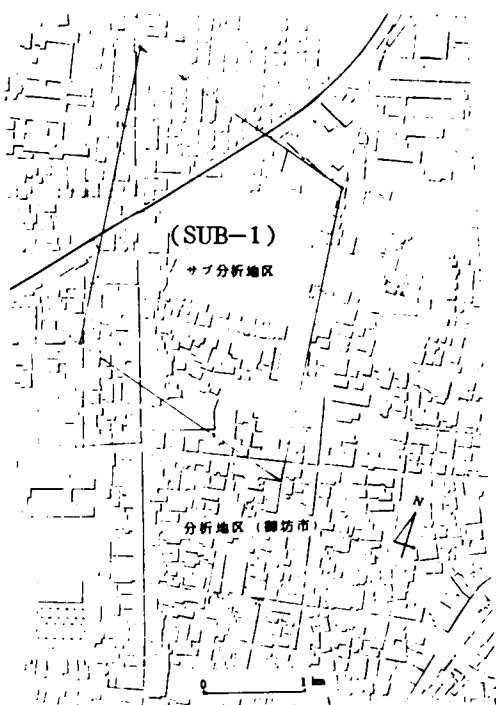
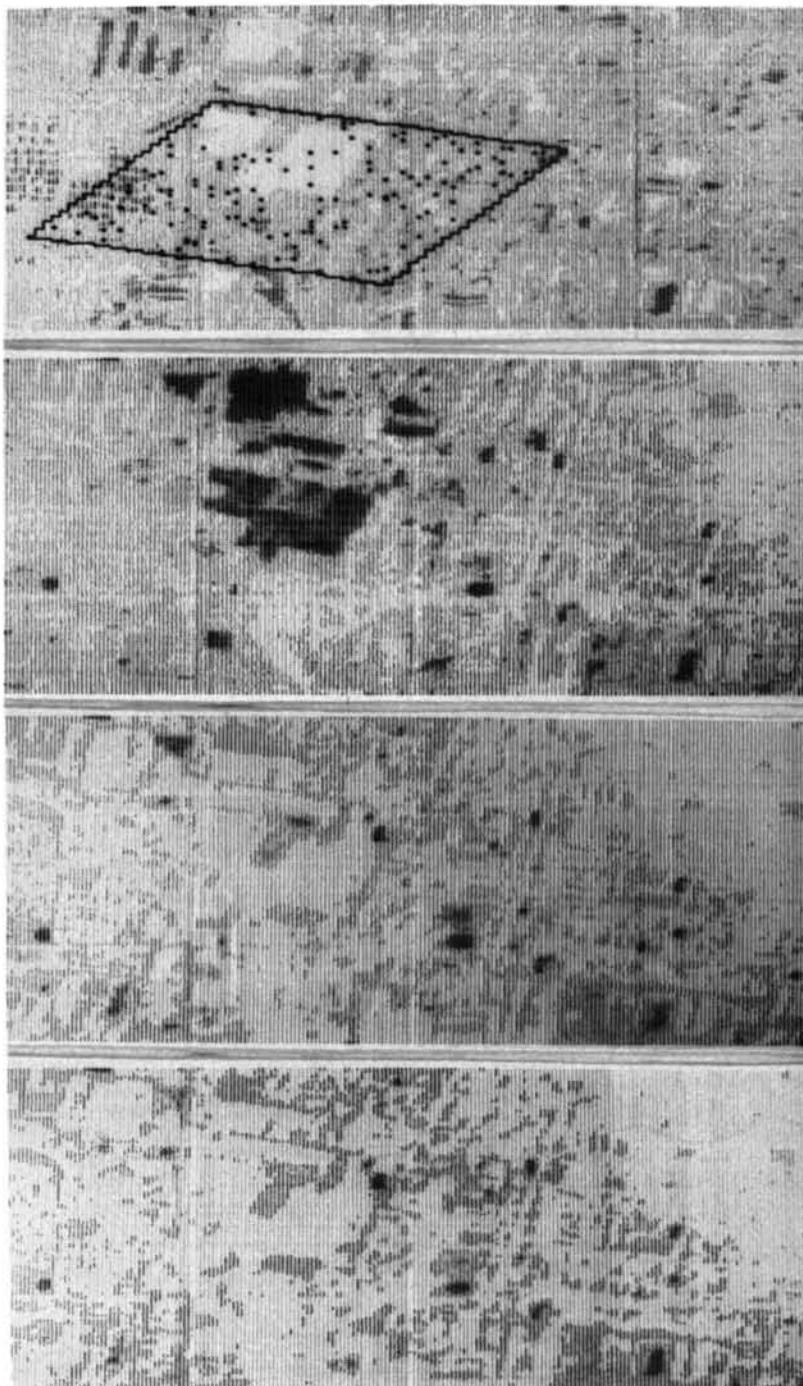


図 53-2 分析地区とサブ分析地区

表 53-1 グレースマップのレベル指定

レベル番号	レ ベ ル 間 隔	出力記号
1	0 ~ 15	•
2	16 ~ 31	—
3	32 ~ 47	=
4	48 ~ 63	+
5	64 ~ 79	*
6	80 ~ 95	I
7	96 ~ 111	O
8	112 ~ 127	O —
9	128 ~ 143	N Z
10	144 ~ 255	N Z *



(d) チャンネル11

(c) チャンネル9

(b) チャンネル7

(a) チャンネル5

図53-3 チャンネル別グレースマップ

て分析地区（図53－2）のグレーマップを作成した。この一部を図53－3に示す。これらのグレーマップ作成と同時に各チャンネルごとにレベルごとの頻度分布^{5,14)}を求めておくことと正規性や分光特性の傾向が理解できる（付図5－2,3参照）。

なお、図53－2の分析地区の選定のためには飛行直下に近いこと、第4章のカラー合成写真の地物判読により分類項目が種々混在している場所であること、雲の陰影の影響を受けない場所であること（図43－3を参考にした）などを考慮に入れた。

5.4 トレーニング地区の選定用図面の作成

分析地区の各画素をチャンネルデータから分類項目に割り当てるには、各分類項目の性質を教師として計算機に記憶させておき、あらかじめ定められた分類手法によって各画素をいずれかの分類項目に割り当てる方法が採用されてきている。この教師を作るトレーニング地区のデータの質は分類結果を左右する要因の1つである。従来、トレーニング地区をライン・カラムによって選定するのにチャンネル別のグレーマップなどが使われているが、分析地区内の分類項目の構成が都市域のごとく複雑な場合、グレーマップの座標すなわちライン・カラムと地表座標との関連をつけることが困難なため、一部の分類項目のトレーニング地区を単チャンネルのグレーマップから切り出すことが困難なことがある。そこで、本節ではトレーニング地区の選定図面として下記のⅰ)～ⅴ)の種類を作成し、このグレーマップ内のパターンとカラー航空写真、都市計画図の地物と対比し、最適なトレーニング地区選定用図面を選び出すことにする。このことは、トレーニング地区の分類項目別の統計量の質を向上させることになり、不必要な繰返し計算を少なくできる効果がある。

- ⅰ) チャンネル別グレーマップ
- ⅱ) パスラジアンズ除去のグレーマップ
- ⅲ) チャンネル和によるグレーマップ
- ⅳ) Median法によるグレーマップ
- ⅴ) Ward法によるグレーマップ

5.4.1 チャンネル別グレーマップ

チャンネル1（波長域0.38～0.42 μm ）では白色系構造物と運動場以外はほとんど地物の位置を確認することができなかった。チャンネル3（波長域0.45～0.50 μm ）では裸地、稲、白色系または青色の屋根の確認は容易で軌道跡の位置もほぼ確認できる。チャンネル5（波長域0.55～0.60 μm ）では白色系の屋根、裸地の確認が容易である。チャンネル7（波長域0.65～0.69 μm ）の地物パターンはチャンネル5のそれと類似した傾向を示す。チャンネル9（波長域0.80～0.89 μm ）

は白色系の屋根と植生が判読できるが、稲と雑草の区別がつかない(図53-3参照)。

チャンネル11(波長域8.0~14.0 μm)は植生と灰色系の建物(コンクリートのくすんだ屋上、瓦屋根など)が確認できる。また、水と陰影部はチャンネル5~11で確認しやすい。道路は全チャンネルとも確認しにくい、2~8画素以上の道路幅を有するものについてはチャンネル8, 11などで判読できる。

表54-1 グレーマップ上の分類項目の判読結果

これらの結果をまとめると

表54-1となる。この表54-

1の○印は即座に確認可能、
△印は確認可能であるが、かなり判読時間を要することを

分類項目 チャンネル	水	船	緑植生	裸地	青屋根	白屋根	道路	瓦屋根	軌道跡	陰影
	W	R	G	S	B	水	-	H	T	D
1						○				
3				○	○	○	△		△	
5	○			○		○				○
7	○			○		○				○
9	○		○			○				○
11	○		○			○	△	○		○

意味している。なお、表54-1の分類項目は5.5におけるUSAS手法を適用するに際してあらかじめ与えておく事項である。この分類項目の中で家屋を細区分している理由は建物を1つの分類項目にした場合、高い精度の分類結果を得ることができなかったことに基因している。^{5,15)}

5.4.2 パスラジアンズ除去のグレーマップ

パスラジアンズの簡易的除去法は第2章の式(24-25)で示したごとく波長域の近いチャンネル差を用いることである。そこで式(24-25)の i, j の組合せ方を表54-2のごとく5種類考えることにし、それぞれのグレーマップを作成した。^{5,16)} これらの中で地物を識別できるグレーマップはほとんどなく、わずかに $i=11, j=9$ を採用したグレーマップ(図54-1)において軌道跡と平屋の瓦屋根の部分を確認できるにすぎなかった。

表54-2

i	j
3	1
5	3
7	5
9	7
11	9

5.4.3 チャンネル和によるグレーマップ

チャンネル演算の実験結果によれば、分類項目をマクロ的に表現する演算式はチャンネル7, 9, 11の和であることが明らかとなった。^{5,17)} この結果を図54-2に示す。この図において、4×4画素程度以上の広がりを持つ地物については確認可能であった。しかし、線情報である道路、軌道跡や数画素ごとに異なった地物が並ぶ場所、あるいは1画素中に複数の分類項目(表54-1)が含まれる地区(混在地区と呼ぶ)では地物の確認が困難であった。

また、画素の広がりが大きくても植生の中で稲と雑草が区別できていない。

5.4.4 教師なし分類によるグレーマップ

Ward法とMedian法によるグレーマップはともにクラスタ分析を適用して作成するものであるから、以下両者をまとめて説明することにする。

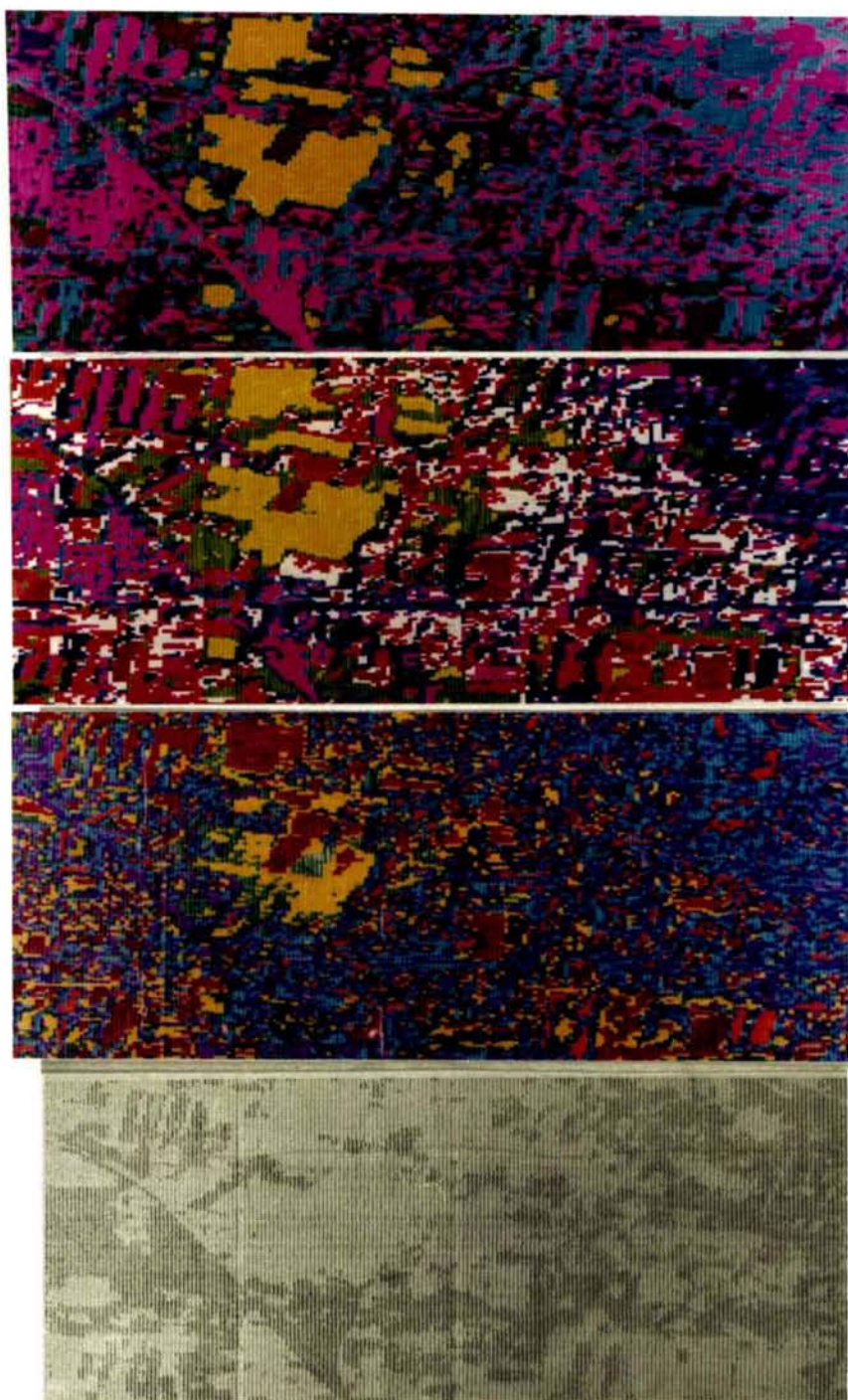


図 54-1 パスラジアンズ除去

図 54-2 チャンネル和

図 54-3 Ward 法

図 54-4 Median 法

クラスタ分析手法は多変量データを分析するときにグループ分けの目的で使われており、MSS^{5.18)}のチャンネルデータを変数ベクトルとした地表物体をクラスタに統合するのに応用できる。こ

のクラスタを見出す基本的概念は変数間の距離によるものであり、クラスタを形成させる一般的なモデルを作成することは現在のところ至難とされ、取り扱うデータの質、たとえば連続型変数、順位数、非順位数、ビット型変数などによっても適用される手法が異なっている。クラスタ分析手法を大別すると最短距離法 (NN)、最長距離法 (FN)、Median 法 (MD)、重心法 (CR)、群平均法 (GA)、Ward 法 (WR) など

が組合せ手法としてあり、これらの諸手法の距離 d_{ir} を表現する式 (54-1) の係数 α_p , α_q , β , γ は表 54-3 の通りである。^{5.19)}

表 54-3 組合せ手法の係数値

手法 \ 係数	α_p	α_q	β	γ
NN	0.5	0.5	0	-0.5
FN	0.5	0.5	0	0.5
MD	0.5	0.5	-0.25	0
CR	$\frac{n_p}{n_r}$	$\frac{n_q}{n_r}$	$-\alpha_p \alpha_q$	0
GA	$\frac{n_p}{n_r}$	$\frac{n_q}{n_r}$	0	0
WR	$\frac{n_i + n_p}{n_i + n_r}$	$\frac{n_i + n_q}{n_i + n_r}$	$-\frac{n_i}{n_i + n_r}$	0

$$d_{ir} = \alpha_p d_{ip} + \alpha_q d_{iq} + \beta d_{pq} + \gamma |d_{ip} - d_{iq}| \quad \dots\dots\dots (54-1)$$

上式 (54-1) では d_{pq} を p クラスタと q クラスタ間の類似性尺度とし、 p と q が結合しているときの i クラスタに対するユークリッド距離 d_{ir} として表現している。

上記の 6 手法以外にも可変法、可変群平均法などがあり、これらの 8 種の手法について空間の不変性、濃縮現象、濃縮と拡散の定性および結合距離の単調非減少性などの比較検討がなされている。^{5.20)} これらの手法の中で理論体系が存在するのが Ward 法でクラスタ分析に最適とされている。^{5.21)} しかし、航空機による MSS データに対する適用性を吟味する意味で Ward 法の比較検討用として Median 法を採用した。^{5.22)} Median, Ward 両法に用いるデータ抽出地区は分析地区全体では標本数が多すぎるのでサブ分析地区 (図 53-2 参照) に限定した。この地区は分析地区のはは中央付近の北緯 $34^{\circ} 53' 24'' \sim 30''$ 、東緯 $135^{\circ} 9' 24'' \sim 33''$ に近い地区 (図 53-3(d) の^{5.23)} 矩形内: 画素数は 2772) である。このサブ分析地区 (SUB-1) の画素番号を利用して、乱数を用いて全画素の 5%, 10%, 20% の標本を抽出したところ、5% (145 画素) で十分地表物の主要な位置が含まれていることが確認されたので、145 画素のデータをクラスタ分析することにした。この 145 画素のデータはサブ分析地区内の分類項目に含まれるそれぞれの画素数 $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k$ に比例して抽出されると考えて差支えない。

145 の標本は図 53-3(d) の SUB-1 内の黒点の位置の画素である。このデータを用いてクラ

スタ分析をし、この結果から樹状図を作成した。これを図54-3 (Ward法)、図54-4 (Median法) に示す。

Ward法の樹状図において目的の分類項目数10個(表54-1参照)に近いクラス数8とその約倍程度のクラス数19を決定し、ユークリッド距離法の分類手法を用いて分析地区の各画素をいずれかのクラスに割り当てることにした。

Ward法の8クラス目の分類結果(付図5-4)によると地表の分布面積が2×2画素以上の地物は航空写真と対比すればグレースケールマップ上で確認が容易であった。ただし、裸地の一部が稲と同じクラスに割り当てられたり、稲と休耕地の雑草とが同じクラスに割り当てられ、50画素以上集中している雑草の境界が明らかにされていない部分も生じている。そこで19クラスを代表する記号を用いて分析地区を分類し、この結果(図54-5)によれば上記の弊害が除去されトレーニング地区の選定資料としてほぼ満足されたが、数画素ごとに地物の

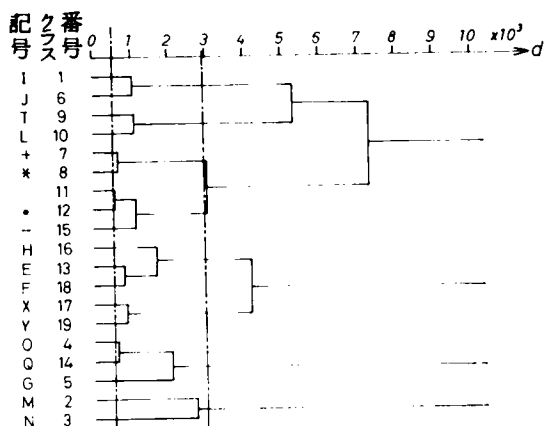


図54-3 Ward法の樹状図

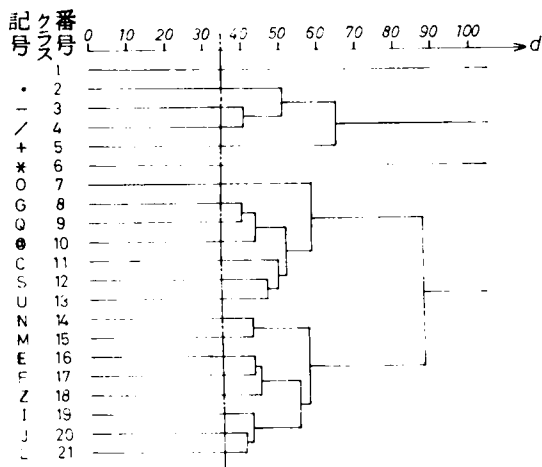


図54-4 Median法の樹状図

の異なる家屋密集地区で建物・植生・裸地などが不規則に混在している場所では8クラスの分類結果より地物を判定するのがより困難であった。そこで、これらの複雑な場所では航空写真上の地物の形状を参考にして2ないし3のクラスを視察により統合しながら地物を調査すると数画素の地物も判断し識別することができることが明らかとなった。

つぎに、Median法による樹状図からWard法の19クラスに近い21クラスを選定し、図54-4のクラス記号を定めることにした。これらの21のクラス記号を用いてユークリッド距離法によって分類された結果が図54-6である。Ward法による19クラスの分類結果(図54-5)とMedian法による21クラスの分類結果(図54-6)を比較すると部分的にクラス内での分類は

異なるが総合的には両者ともトレーニング地区を切り出す資料としては実用性があると判断される。そこで、両者によって得られた各クラスターの分光特性記録を比較検討してみた。

Ward法の各クラスターに含まれる画素データの分光曲線をXYプロットで描き、付図5-5に示し、これらの一部を図54-7に示す。また、Median法の各クラスターの分光曲線を付図5-6に示し、図54-7に対応するクラスターを選び図54-8に示す。図54-7と図54-8を比較すると

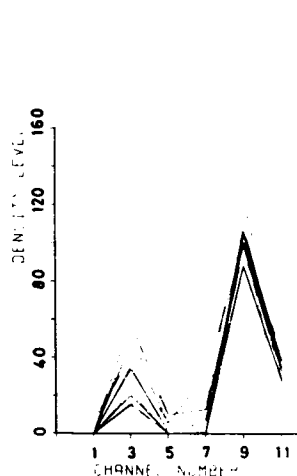


図 54-7-1
(Ward 法)

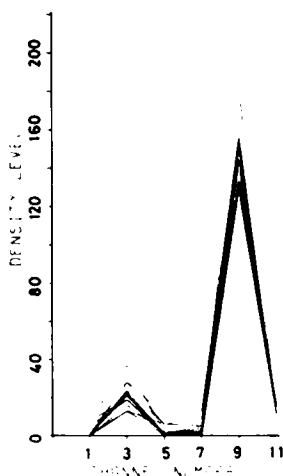


図 54-7-2
(Ward 法)

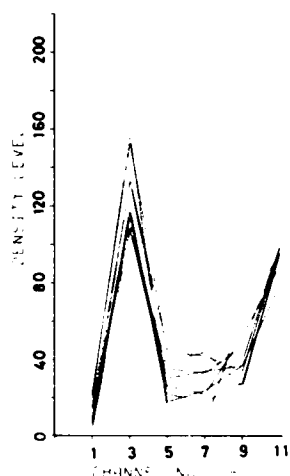


図 54-7-3
(Ward 法)

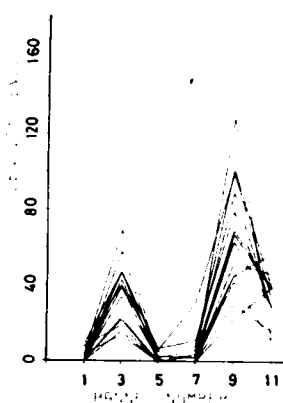


図 54-8-1
(Median 法)

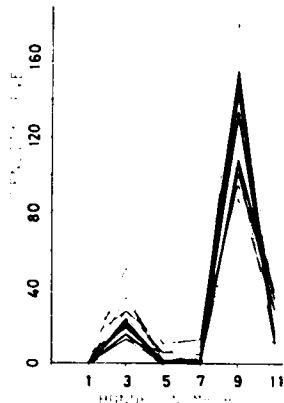


図 54-8-2
(Median 法)

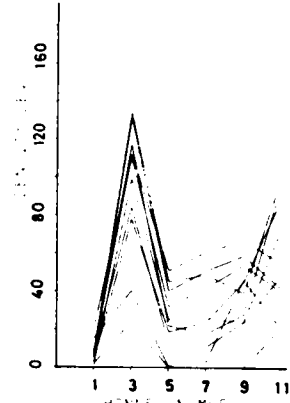


図 54-8-3
(Median 法)

Ward法のクラスターの方が近親性のある類似した画素データが集められていることがわかる。

5.4.5 トレーニング地区選定用図面の決定

上記のⅰ)～ⅴ)のグレースケールのパターンを比較検討したところ教師なし分類によるグレースケールⅣ), ⅴ)がⅰ)～ⅲ)より分析地区の地物をよく表現していた。教師なし分類の中ではクラスタ内の各データの分光曲線を調べたところWard法のグレースケールがMedian法のそれより近親性のあるデータをグループ化し、クラスタとして構成していることが、5.4.4の実験資料などから明らかにされた。

したがって、以後のUSAS手法のトレーニング地区選定資料にはWard法によるグレースケールを採用することにする。また、これらの結果はUSAS手法の第1段階処理に教師なし分類手法を適用する理由を裏付けたことにもなる。

5.5 トレーニング地区の選定とその統計量

5.5.1 トレーニング地区の選定

分析地区が比較的簡単なパターン構成をしており、グレースケールで得られた地表パターンを航空写真などで対比しながらトレーニング地区が容易に切り出せる場合は単チャンネルのグレースケール上にトレーニング地区を指定することができる。本研究の分析地区は複雑なパターン構成のためUSAS手法の適用を試みるが、この分類結果の効用を調べるためにLARSYSを用いた単チャンネルグレースケール(チャンネル9使用)上でトレーニング地区(TRA-A)を選定し、これを用いて分類を実施する。単チャンネルのグレースケール上に決定されたトレーニング地区は図55-1-Aとして示してある。この処理過程は図52-1の(ハ)に相当するものである。

USAS手法によるトレーニング地区(TRA-C)の選定図は前節で指定されたWard法によるものでトレーニング地区の分布位置は図55-1-Cの通りである。図55-1-A, Cの各分類項目は下記に示すクラスタと分類項目の対比検討の結果によるもので、当初は分類項目10とし水と陰影部の分光特性が類似していたので分類項目を9としてある。

つぎに、図55-1-Bのトレーニング地区(TRA-B)はUSAS手法の第1段階を適用し、第2段階の分類項目とクラスタの対比を分光曲線図で実施しない処理過程によるものである。すなわち、TRA-Bのトレーニング選定図はWard法のグレースケールを使用し、このグレースケールから地物の類似性を調べ、分類項目を定性的判断によって一部変更し、表55-1のごとく11の地表クラスとしたものである。したがって、TRA-BとTRA-Cの分類結果の差からUSAS手法の第2段階目の処理効果を考察することができよう。

(1) 分類項目とクラスタの対比

10個の分類項目に含まれる地物の分光特性がクラスタの分光特性に類似していればMSSの

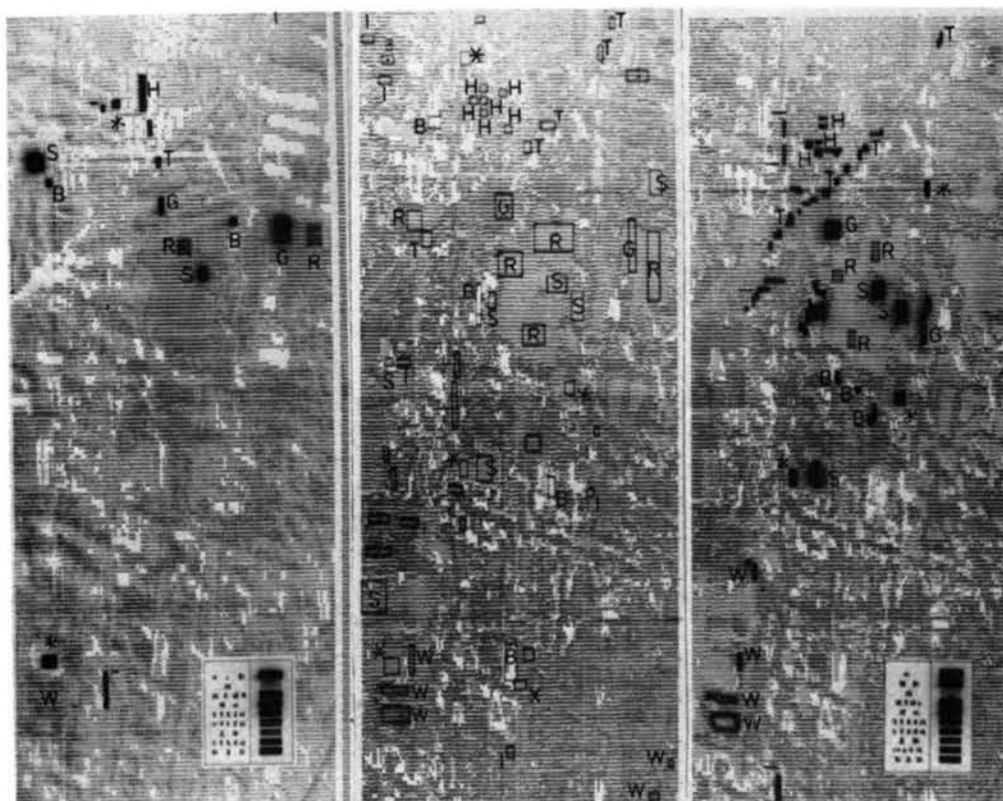


図 55-1-A

図 55-1-B

図 55-1-C

チャンネルデータによる分類結果は精度の高いものが得られると予想される。ここでは、分類項目の検討をする目的でWard法のクラスタと分類項目とを対比して無理な分類項目を除外し、出現確率の高い分類項目の逸脱を見出し、追加しようとするものである。

表55-1の10種の分類項目の分光曲線をTRA-Cのトレーニング地区より求めたところ、水と陰影の分光曲線が類似していたので水と陰影を1つの分類項目としてまとめることにした。つぎに、9種の分類項目について再度TRA-Cの分光曲線

表55-1 トレーニング地区の標本数

分類項目とその記号			L.P出力 用の記号	各トレーニング地区の標本数		
				TRA-A	TRA-B	TRA-C
水	陰影	g ₁	W	50	98	76
						14
樹		g ₂	R	6	352	41
緑色系植物		g ₃	G	18	105	46
裸地		g ₄	S	18	257	70
青色系屋根		g ₅	B	42	95	42
白色系屋根		g ₆	*	12	82	36
道	路	g ₇	—	27	46	55
灰色系屋根		g ₈	H	21	60	50
軌道	線	g ₉	T	6	51	52
黒つんだビル		g ₁₀	・	—	113	—
赤色系屋根		g ₁₁	I	—	29	—

図をXYプロットで描いてみた。この結果が付図5-7である。また、付図5-8には放射状ダイアグラムを示した。付図5-8は作図形状から地物などを推定することもできるが、付図5-7の形式が一般に理解されやすいので以下分光曲線で考察をすることにする。

(2) 分類項目の検討

クラスタの分光曲線図を基準にして9個の分類項目の分光曲線図との対応性を調べ、まとめたものが表55-2である。この表から明らかのようにC₂、C₄のクラスタが分類項目に対応していないことが判明した。そこで、分類項目の逸脱の可能性があるため、図54-3のWard法の樹状図の距離dを用いてC₂、C₄の類似クラスタを調べることにする。C₂はC₃と、C₄はC₁₄と結合しやすいから、分類時にC₂、C₄に相当する分類項目が与えられていないとするならばC₂はC₃

表 55-2 クラスタCと分類項目gの関係

クラスタ	分類項目	クラスタ	分類項目
C ₁	g ₆	C ₁₁	g ₅
C ₂	—	C ₁₂	g ₇ [*] , g ₈ [*]
C ₃	g ₃	C ₁₃	g ₈
C ₄	—	C ₁₄	g ₁
C ₅	g ₇	C ₁₅	g ₅
C ₆	g ₂	C ₁₆	g ₈
C ₇	g ₄	C ₁₇	g ₇ , g ₉
C ₈	g ₄	C ₁₈	g ₇ , g ₈
C ₉	g ₅ [*]	C ₁₉	g ₇ , g ₉
C ₁₀	g ₅ , g ₈ [*]		

注) *印はごく一部が該当するもの

と同一視され、C₄はC₁₄に割り当てられると推定できる。そこで、C₂がC₃に、C₄がC₁₄に結合されたクラスタで分類されたとき目的の分類項目として適当であるとすればC₂、C₄に相応する分類項目gを新しい分類項目として加える必要はなく、また、不適当ならば新しい分類項目を設ける必要があることになる。これらの判断をするには図53-3(d)のサンプル位置の地物が航空写真上で判読できる場合、これを読み取り、判読不可能な場合はC₂、C₄の標本点の周辺分布から地物推定を行うことにした。

図53-2の分析地区ではC₂は植生と建物の境界に分布している傾向がある。また、C₄は建造物の一部(とくにコンクリートのかなり古い屋上)として表われている傾向がある。

以上のことからC₂、C₄は新しい分類項目として設けるよりもむしろC₂はC₃に、C₄はC₁₄に結合した方が目的に適した分類ができると考えられる。

つぎに、分類項目内の分離の必要性について検討してみる。表55-2において青色系屋根(g₅)、道路(g₇)、瓦屋根(g₈)、軌道跡(g₉)は複数のクラスタが対応しており、前述の分光曲線や放射状ダイアグラムだけでは分類項目に対する評価はしにくい。そこで各種図形処理プログラムを用いてトレーニング地区のデータを調べることにする。

5.5.2 分類項目検討用の図形処理

クラスターや分類項目のチャンネルデータの分光特性を調べるにはデジタル量である平均値と分散による評価以外に図形表示による評価段階を経ると、より正確な分光特性の性質を判断することができると思われる。

図形処理プログラムによって分類項目やクラスターの多変量データを平面図形に表示するには下記の条件を満足するとき、最適な条件といえよう。

- i) 図形表示によって評価困難な地物特性が観測可能なこと。
- ii) 図面数の減少を計れること。
- iii) 物理的、数学的なデータの質を損じないこと。
- iv) 分類項目の分離性を観察できる図面であること。
- v) 種々の散布図などから変数ベクトルの数を減少させる判断ができること。

そこで、上述の項目 i) ～ v) の条件に適う星座グラフ、項目 i), iii) ～ v) を満足する 4 軸法の散布図、項目 iv) を満足する非線形な拡大散布図などの作図理論を述べ、この理論を用いてトレーニング地区の分類項目のデータの適用を試みる。

(1) 星座法

チャンネルデータを分類項目別に検討するには、平面図形に投影することが理解を容易にする。星座グラフは半円形平面にチャンネルデータをベクトル表示し、最終到達位置とその過程によって分類項目や地物を表現しようとするものであり、星座法によって星座グラフが作成される。この星座グラフは分類項目間の分離性や同一分類項目のデータのバラツキ状態を調べることができる。この星座法に M S S のチャンネルデータの適用を試み従来の星座法の関係因子にチャンネルの特性を考慮して、新たな要因 ϵ を加えたのでその関係式を以下説明する。

チャンネルデータ $\mathbf{x} \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ から 1 つの地物特性変数 Y が線形結合（たとえば、主成分分析によって得られた値）として与えられたとし、さらに関数 f によって式 (55-1) の変換が可能であるとする。

$$\eta = f(Y) \quad \xi = f(\mathbf{x}) \quad \dots\dots\dots (55-1)$$

ここに、 η , ξ は半円形上に分散する極座標値であり、チャンネルデータのレベルを偏角のレベルに、 Y は円の半径 R に変換するものとする。式 (55-1) の $f(\mathbf{x})$ と $f(Y)$ は式 (55-2) の範囲となる。

$$0 \leq f(\mathbf{x}) \leq \pi, \quad 0 \leq f(Y) < R \quad \dots\dots\dots (55-2)$$

星座法では $f(\mathbf{x})$ が \mathbf{x} の 1 次線形で表わされているが、チャンネルデータ \mathbf{x} のレベルが大き

い値を取ることが少ない。この傾向は星座グラフ上では作図位置が右よりになる傾向として表われる。そこで、この作図傾向に着目し、 ε の因子を式(55-3)の形式で書き表わすことにした。

$$f(x) = a\sqrt[n]{x} + b \quad \dots\dots\dots (55-3)$$

ただし、
$$\left. \begin{aligned} a &= \pi / (x_t - x_l), & b &= x_l / (x_l - x_t) \\ x_t &= \max \sqrt[n]{x} & , & \quad x_l = \min \sqrt[n]{x} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (55-4)$$

地物特性変数 Y とチャンネルデータ x が表55-3から、上式(55-1)～(55-4)の関係によって表55-4の形式に変換される。そこで、式(53-5)の複素数 Z によって ξ を対応づけることもできる。

表 55-3 チャンネルデータ変数 x と地物特性変数 Y

g \ j	1	2	-----	n	f(x)
1	x_{11}	x_{21}	-----	x_{n1}	Y_1
2	x_{12}	x_{22}		x_{n2}	Y_2
⋮	⋮		x_{33}	⋮	⋮
k	x_{1k}	-----		x_{nk}	Y_k

表 55-4 変数ベクトル ξ と地物特性変数 η の対応表

g \ j	1	2	-----	n	f(ξ)
1	ξ_{11}	ξ_{21}	-----	ξ_{n1}	η_1
2	ξ_{12}	ξ_{22}		ξ_{n2}	η_2
⋮	⋮		ξ_{33}	⋮	⋮
k	ξ_{1k}	-----		ξ_{nk}	η_k

$$Z = \sum_{j=1}^n \beta_j e^{i\xi_j} \quad (i = \sqrt{-1}) \quad \dots\dots\dots (55-5)$$

ところで、式(55-5)において $R=n$ とし、 β_j を ξ_j の軽重率と考えることにすれば、式(53-6)、(53-7)が成立する。ただし、 q は分類項目とする。

$$\sum_{j=1}^n \beta_j = n \quad (\beta_j \geq 0) \quad \dots\dots\dots (55-6)$$

$$|Z_q| = \left| \sum_{j=1}^n \beta_j e^{i\xi_j q} \right| \leq \sum_{j=1}^n \beta_j = n \quad \dots\dots\dots (55-7)$$

上式の Z_q は半径 n の半円内もしくは半円上において、 β の軽重率と ξ の偏角によって連結されて複素平面上に表わされる。これらの関係を図55-2に示す。この半円形的位置によって画素の地物特性を表現することができる。

たとえば、図55-2のグループAはすべての x (反射・放射率)が低いことを示し、グループBはすべてのチャンネルに対する x_j が中位のレベルを示すか、もしくは平均値が中位となる場合である。グループCはすべての x が高い値の地物であることを示す。

これらの関係において $n=6$ としてトレーニング地区 (TRA-C) 9 種の分類項目のデータを図示した結果が図 55-3 である。この結果から、水と影 (W)、裸地 (S)、白色系構造物 (*) などは他の分類項目と分離できることが解る。また、道路 (一) と灰色系屋根 (H) も分離容易とも思われるが右中央付近の分布状況が不明なので結論を出しにくい。

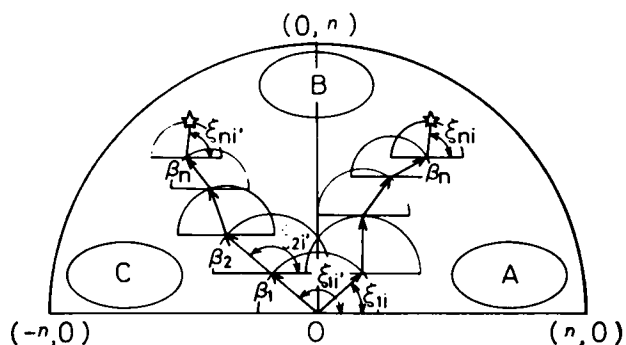


図 55-2 星座法による変数ベクトルの表示

W : 水と影
R : 稲
G : 緑色系植物
S : 裸地

B : 青屋根
* : 白屋根
一 : 道路
H : 灰色系屋根
T : 軌道跡

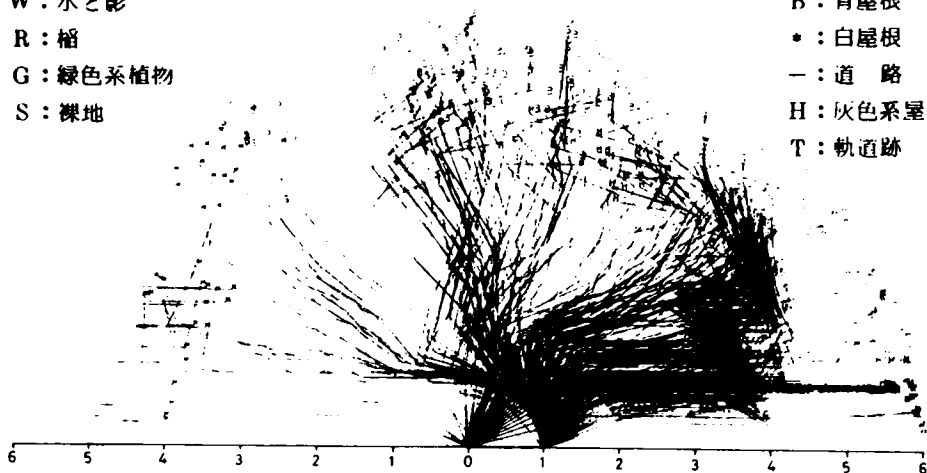


図 55-3 星座グラフ ($\epsilon = 2$)

植生の稲 (R)、緑色系植生 (G)、青色系屋根 (B)、軌道跡 (T) の 4 種の分類項目についてのみ、星座グラフから分離性を判定することが困難といえる。

なお、 $\beta_j = 1$ 以外の適用や星座グラフの経路による地物の検討は今後の研究課題である。

(2) 4 軸法による散布図

多チャンネルデータを有する分類項目 q を低次元空間で表現するには通常 2 チャンネルの直交軸上に分類項目の 2 種を選び画素データをプロットする。

この方法ではチャンネル数6に対して $6C_2$ 種類の散布図が存在するため、分類項目別の分離性とバラツキ状態を検討するのに図面数が多く作図と検討に長時間を要する。そこで、チャンネル間の無相関のものを見出すことにする。図55-4, 5 (TRA-Cデータ使用)は分類項目間の分離性と相関性、項目内のバラツキを調べる散布図の一例である。すなわち、図55-4は相関性の高いチャンネルを示し、図55-5は無相関のものを示している。前者はいずれかのチャンネル省略できることを意味し、後者は分類をするための有効または無効なチャンネル

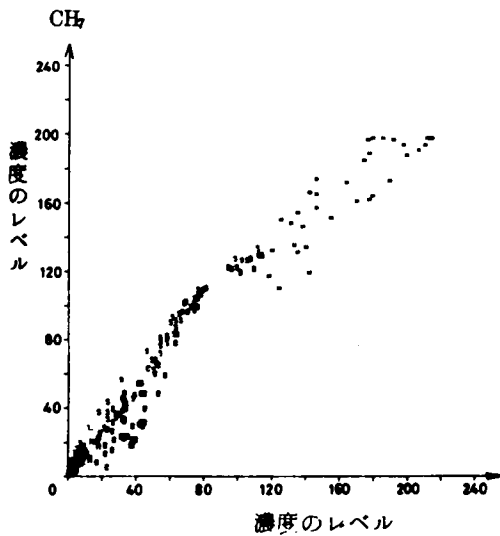


図 55-4 相関の高い例

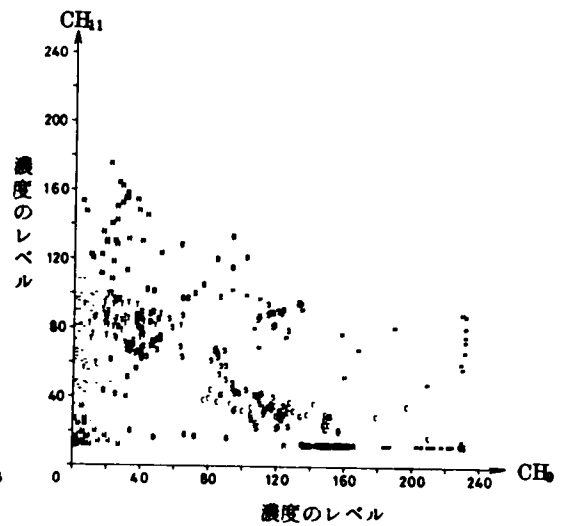


図 55-5 無相関の例

ルの選択に利用できる。表55-1のTRA-Cの9種の分類項目の散布図の中で図55-5のごとき無相関のチャンネルを選定したところ表55-5の結果を得た。この表の中で○印は相関性の低いもの、◎印はより相関性の低いものを意味している。この結果を基にして分類項目間の分離性と項目内のバラツキ状態を適確に表現するチャンネルを4種選定し、4軸法による散布図の作成を試みた。この4軸法による散布図の発想はチャンネルデータが負の値を持たないことに着目したものである。

この4軸法の散布図は利用チャンネルをすべて使用できない点では星座グラフより図形表現力に欠けるが4軸の組合せが事前に既知である

表55-5 散布図による地表クラス分離性

チャンネル番号	1	3	5	7	9	11
1						
3					◎	◎
5				●		○
7						○
9						○
11						

注) ●印はきわめて相関性が高いもの

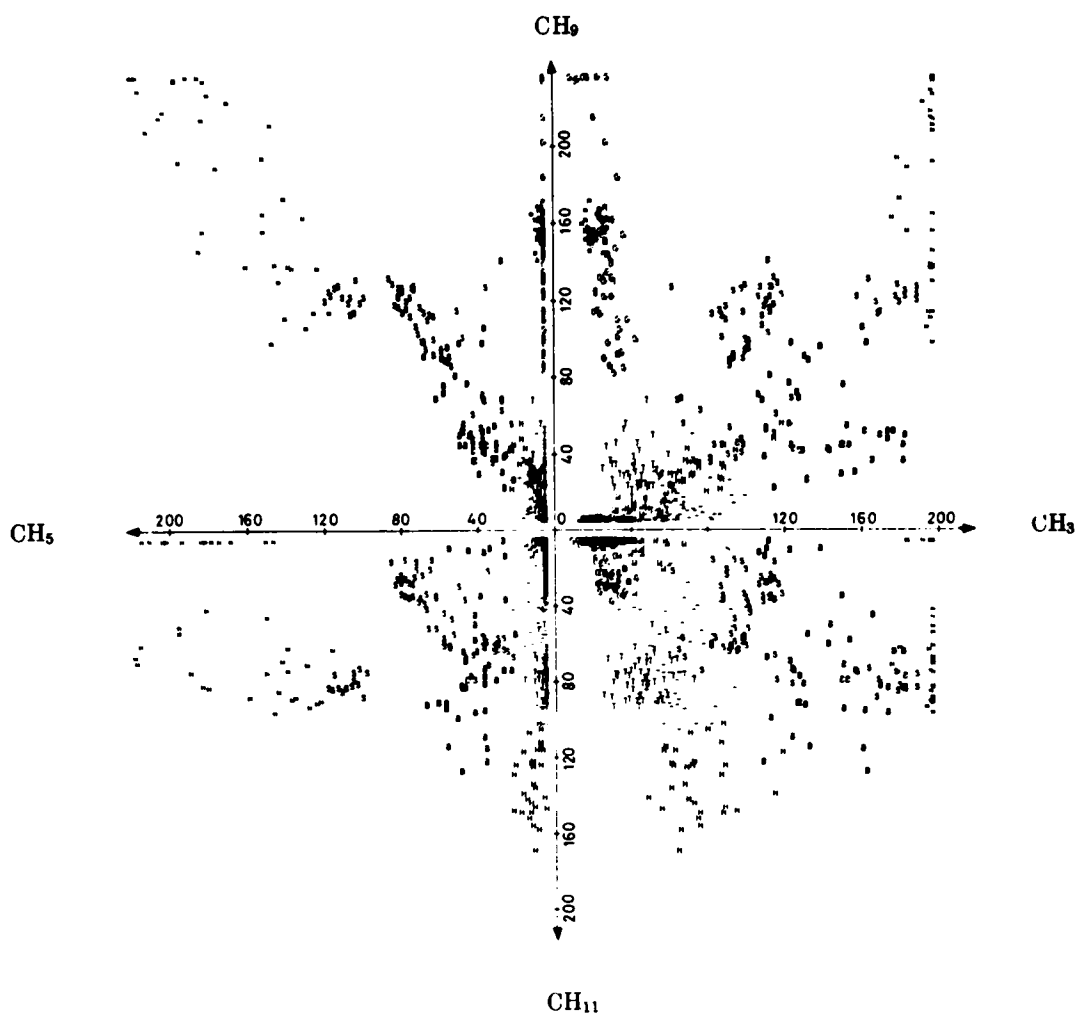


図 55 - 6 4 軸法の散布図

なら星座グラフより詳細な分類項目間の分離性や分類項目内のデータのバラツキを調べることができる。図55-6はX Yプロッタにより表55-1のTRA-Cのデータを作図させたものである。図55-6の第1象限の散布図から(H),(T),(一)の記号以外分離可能と判定できる。第3,4象限の散布図から(H)は他の分類項目と分離可能ながわかる。したがって、4軸法による散布図からは道路(一)と軌道跡(T)の分離状態が多少不明確であり、他の分類項目は分

類結果が良いと予想できる。

(3) 非線形な拡大散布図

各チャンネルのデータは $8bit$ 保管である。このデータの記録を調べてみると高々 $7bit$ 程度しか使用されておらず、記録値の多くは低レベルに集中している傾向がみられる。このことから記録レベルを等間隔の尺度で表現すると、各画素データは原点付近に集中してくる（付図 5-8 参照）。この集中部分に対して視覚効果を向上させる作図法が要求される。そこで、4 軸法による散布図の 1 つの象限について、さらに詳細な分類項目の性状を調べるために、式 (55-8) ~ (55-10) の関係を通き非線形な拡大散布図の作成を試みた。

いま、チャンネル i, j のデータ値を x_i, x_j とすると、すべての画素データを \bar{x}, \bar{y} 座標上の $0 \leq \bar{x} \leq 1, 0 \leq \bar{y} \leq 1$ なる範囲で表現できるように式 (55-8) を用いて (x_i, x_j) を (\bar{x}, \bar{y}) 座標に変換する。

$$\bar{x} = 1 - x_i / d, \quad \bar{y} = 1 - x_j / d \quad \dots\dots\dots (55-8)$$

ただし、 $d = 255$ である。

つぎに、ミンコフスキ空間^{5,25)}を利用して式 (55-9) の座標変換を行う。

$$\left. \begin{aligned} X &= a_1 \bar{x} + a_2 \bar{y} + a_3 \\ Y &= (b_1 + b_2 X^m)^{1/r} + b_3 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (55-9)$$

ただし、 a, b, m は定数であり、 a_1 は式 (55-10) の関係にある。

$$a_1 = 2 / \max(x - y) \quad \dots\dots\dots (55-10)$$

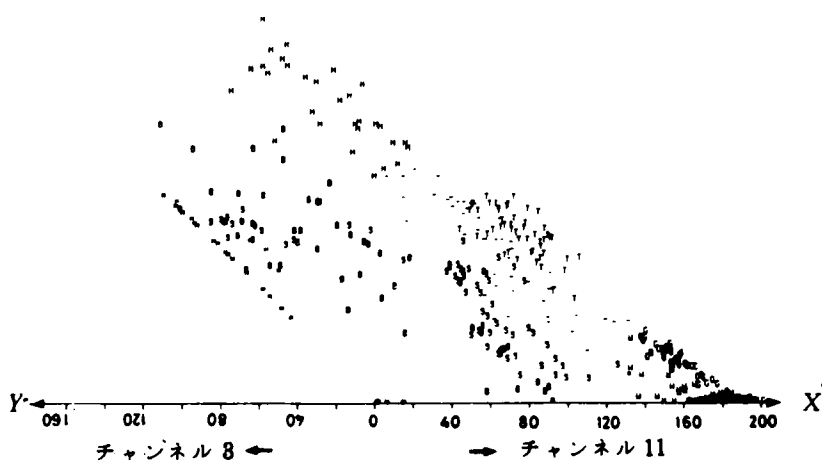


図 55-7 非線形な拡大散布図

これらの関係式による座標変換を用いてチャンネル3と9の拡大散布図を $d = 255$, $a_1 = 1$, $a_2 = -1$, $a_3 = 0$, $b_1 = 1$, $b_2 = -1$, $b_3 = 0$, $r = 4$ として表現したものが図55-7である。この図から軌道跡（T）と道路（一）がほぼ分離可能なことが4軸法による散布図より明確にわかる。ただし、軌道跡（T）に比べ道路（一）はバラツキが大きく灰色系の屋根、裸地、軌道跡などの分類項目に誤判別されやすいといえる。

以上、図形処理の種類別に手法を論述してきた。これらの方法に実験データを適用し、分類項目の分離性を調べたところ、道路は軌道跡にかなり誤分類されると予想されるが、道路を細区分することは、他の分類項目への影響も考えられるので行わないことにした。

その理由は4軸法による散布図から道路以外は分離性が良いこと、道路の材質（コンクリートとアスファルト）の差よりも建物の影の影響が大きいことなどによるものである。

なお、5.5.1および5.5.2で考察した結果、決定された分類項目は分析地区のグランド・カバータイプに適應するものと考えてよいから、この分類項目を以後地表クラスと呼ぶことにする。

(4) 放射状ダイヤグラムと分光曲線図

一般に地物の分光特性を図示するには付図5-5などに示してきた分光曲線がよく使われている。この分光曲線は地物の種類を見きわめるのにも使用できる。この性質を他の図形表示法に応用したのが、放射状ダイヤグラムである。このダイヤグラムは地物の分光特性を1つの多角形状で表現するため形状から逆に地物を推定できる特徴がある。ダイヤグラム表現は放射輝度の値が小さいと利用しにくい欠点がある。

5.5.3 トレーニング地区の地表クラスの統計量

トレーニング地区の各地表クラスの分離性を前述の図面から調べた結果、視覚的に地表クラスの分離性が道路のクラスを除いては、よいと判断されたので、その程度を数量的に調査する目的でトレーニング地区の統計量を求め、この結果を用いて分類する。その手順を以下に述べる。

まず、Ward法によって得られたグレースマップ（図54-5）上に表55-1（T R A - C）の各地表クラスごとに2～3ヶ所のサブクラスが選定されて、総計20のサブクラスでトレーニング地区が構成されている。20のサブクラスを分類前に9種の地表クラスに統合する場合をT-9法とし、分類後に9種の地表クラスに統合する場合をT-20法と呼ぶことにする。このT-9、T-20は地表クラスの統合時期を分類過程のいずれで行なうと効果的かを実験的に調べる目的に用いるものである。このT-20はサブクラスが各々類似性を示す傾向があるため精度の高い分類結果が期待できる。また、T-9は数種のサブクラスを分離前に統合するため分散が大きくなり誤分類の

可能性が大きいと予測される。T-9, T-20の統計量としては各地表クラスもしくはそのサブクラスの標本数(付表5-4), 平均値(付表5-5), 標準偏差(付表5-6)およびチャンネル間の分散行列(付表5-7), 相関係数(付表5-8)などである。T-9, T-20について, 相関係数をチャンネル別に比較すると, チャンネル11は他のチャンネルとの相関性がなく, チャンネル5とチャンネル7はきわめて相関性がある。この結果は表55-5の視覚判定とも一致している。つぎに, チャンネルの寄与率を調べるため

表55-6 Wilks の λ 値

チャンネル	T-9: Wilks の λ	T-20: Wilks の λ
ch1	0.4134	0.1370
ch3	0.1052	0.0473
ch5	0.0847	0.0275
ch7	0.0928	0.0240
ch9	0.1423	0.0331
ch11	0.2332	0.1355

にWilks の λ を求めた。この結果, 表55-6のごとく効力あるチャンネル番号の順序はT-9において, 5, 7, 3, 9, 11, 1, T-20において, 7, 5, 9, 3, 11, 1であることが判明した。チャンネル5と7は相関が高いことが解っているからチャンネル7を採用することにすれば, 効力のある4種類のチャンネル選定はT-9, T-20

とも, チャンネル7, 9, 3, 11となる。この結果は4軸法による散布図の4軸選定を図55-6で視覚判定した結果と一致している。また, チャンネル1, 11はT-9, T-20ともに地表クラス分けに対して寄与率が低い。チャンネル1はグレーマップからも地物判読にほとんど役立たなかったことと同一結果を示したが, チャンネル11が有効でないということはチャンネル別グレーマップおよび散布図からは得られない結果である。このことから, チャンネル11は可視光域と近赤外光域の波長で地物が分離できないパターンに対する寄与率が少ないともいえよう。

つぎに, 付表5-6-1~2の統計資料の中で標準偏差が零の地表クラスもしくはサブクラス(注)がT-9, T-20において存在するため最尤法の適用はできなかった。そこで, 線形判別分析法の適用を試みることにする。このためには, 付表5-4~6のデータを用いて判別関数の係数などを求める必要がある。

いま, チャンネルデータを変数ベクトル \mathbf{x} とし判別関数を1次式と仮定すれば, 式(55-11)なる判別関数を想定することができる。

$$Z_i = a_{0i} + a_{1i} x_1 + a_{2i} x_2 + \cdots + a_{ki} x_k \cdots (55-11)$$

上式の判別関数の係数 a は級間分散と級内分散の比を最大にする条件式より求められる。ここでは判別関数の係数算出にSPSS (Statistical Package for the Social Sciences) の DISCRIMINANT ルーチンを用いることにする。^{5,26)} このルーチンには変数選択として直接法, マハラノビスの距離法, Wilks法, Maxminf法, Minresid法, Rao法の6種あるが, 著者の使

注) LARSYSの最尤法を適用した結果によるものである。

用経験によれば、判別結果は同様であり、CPU時間に多少の差異を表55-7のごとく生じた。そこでCPU時間の多少短いRao法を用いて判別関数の係数と Z_i 空間上での地表クラスの重心を求めた。この結果を付表5-9、5-10に示す。

5.5.4 トレーニング地区の分類結果

T-9、T-20のトレーニング地区のデータから得られた判別関数を用いて、固有値の大きい順に判

別関数 Z_1, Z_2 を取り上げ Z_1, Z_2 の平面上に各地表クラスの範囲をクラス別にプロットしたものが図55-8(T-9)、図55-9(T-20)である。 (Z_1, Z_2) 平面の*印は各地表クラスの重心を示し、重心相互間の距離はマハラノビスの距離であり、分散の大きさにもよるが、マハラノビスの距離が大きい程正確な分類がなされる傾向を示している。T-9の結果は、稲 q_2 と雑草 q_3 が近距離にあり、水と影 q_1 、道路 q_7 、灰色系屋根 q_8 、軌道跡 q_9 も近接している、安易な地表クラスの再編成は $(q_2 + q_3)$ 、 $(q_1 + q_7 + q_8 + q_9)$ 、 $(q_4 + q_5)$ 、 q_6 とすることも考えられる。つぎに、分析地区内のトレーニング地区における各標本を線形判別関数によって分類すると表55-8(T-9)、表55-9(T-20)の結果をえる。T-9では平均86.53%の抽出率^{注)}を示し、最も低い抽出率の裸地 q_4 でも78.6%の抽出率を示した。T-20では平均85.22%となり、低抽出率は q_{22}, q_{23} の50.0%, 60.0%である。しかし、この q_{22}, q_{23} の誤判別された地表クラスを調べると q_{21}, q_{22}, q_{23} 内に含まれており、これらを総合した場合抽出率は100%となる。(なお、 q_{kv} の k は地表クラスの種類 v は k のサブクラスを示す)

これらの結果からも各地表クラスの誤分類率が低いので、クラス間の統合は必要ないと判断した。また、T-9、T-20の分類結果から考察したところ、サブクラス20種を地表クラスとして分類しておき、分類図作成時に、サブクラスの統一をした方がT-9の分類図より高精度が得られると判断できた。このことを5.7.1で実証する。

5.6 地表クラス間のチャンネルの選択法

地表クラス間においてはチャンネル i の中で分離性に有効なチャンネルと不必要なチャンネルが存在するため、地表クラスの分離性に対して有効なチャンネルの選択が必要である。そこで、本節では多変量解析に使用されている説明変数選択法の適用を試みる。地物分類をするために必要な地表クラス間の有効でかつできるだけ少ない変数で表わせるチャンネルはチャンネル間相関が小さいこ

表55-7 変数選択法別のCPU時間

標本地区	京 都	武 蔵 野
ク ラ ス 数	3	3
全 標 本 数	909	637
直 接 法	6700 MS	5800 MS
Wilks 法	6200	5600
マハラノビス法	6100	5600
Maxminf 法	6100	5600
Minresid 法	6100	5600
Rao 法	6000	5600

注) 変数の個数はともに6である。

注) 以下で述べる抽出率は特に断わらないかぎり第4章の真の抽出率を意味する。

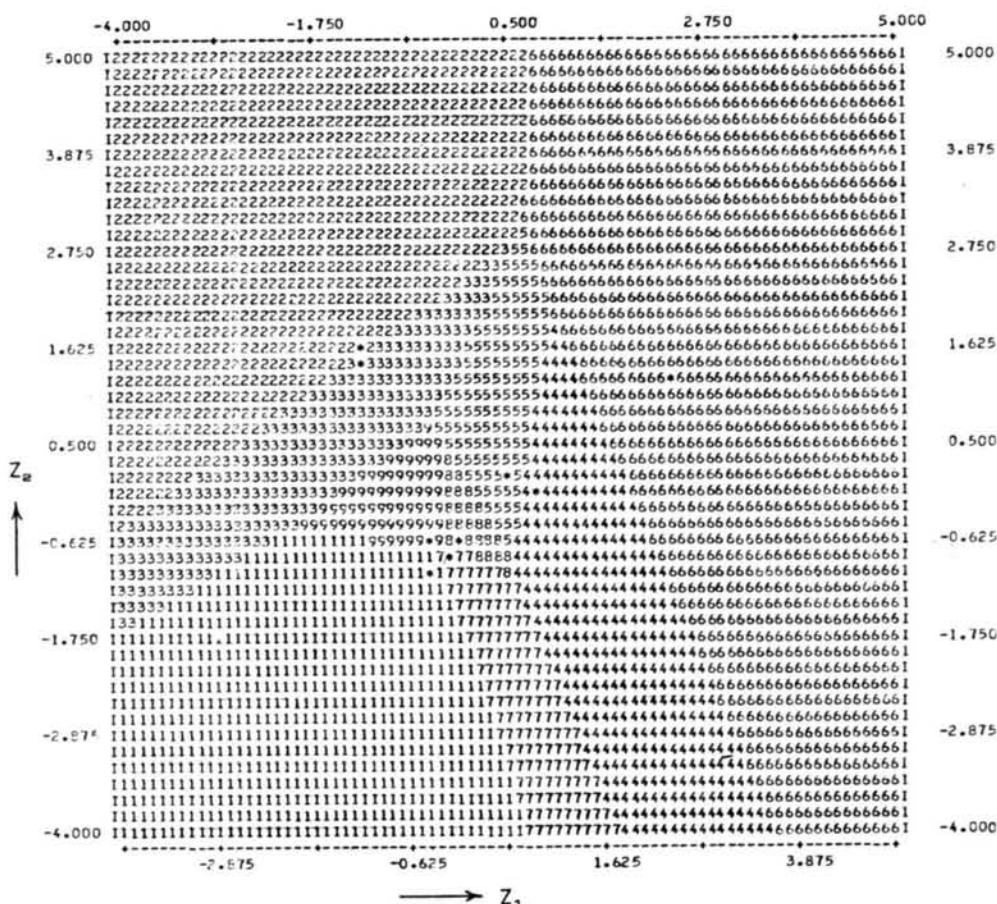


図 55-8 地表クラスの判別得点領域 (T-9)

表 55-8 T-9 の分類結果

地表クラス	標本数	g1	g2	g3	g4	g5	g6	g7	g8	g9
g1	90.	89.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.
g2	41.	0.	41.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
g3	46.	0.	8.	38.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
g4	70.	0.	0.	0.	55.	2.	0.	11.	0.	2.
g5	42.	0.	0.	0.	5.	35.	0.	1.	1.	0.
g6	36.	0.	0.	0.	1.	0.	35.	0.	0.	0.
g7	53.	5.	0.	0.	0.	1.	0.	31.	2.	14.
g8	30.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	30.	0.
g9	52.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	8.	0.	44.
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15.4%	0.0%	84.6%

注) 対角線上の抽出率の平均は 86.52% である。

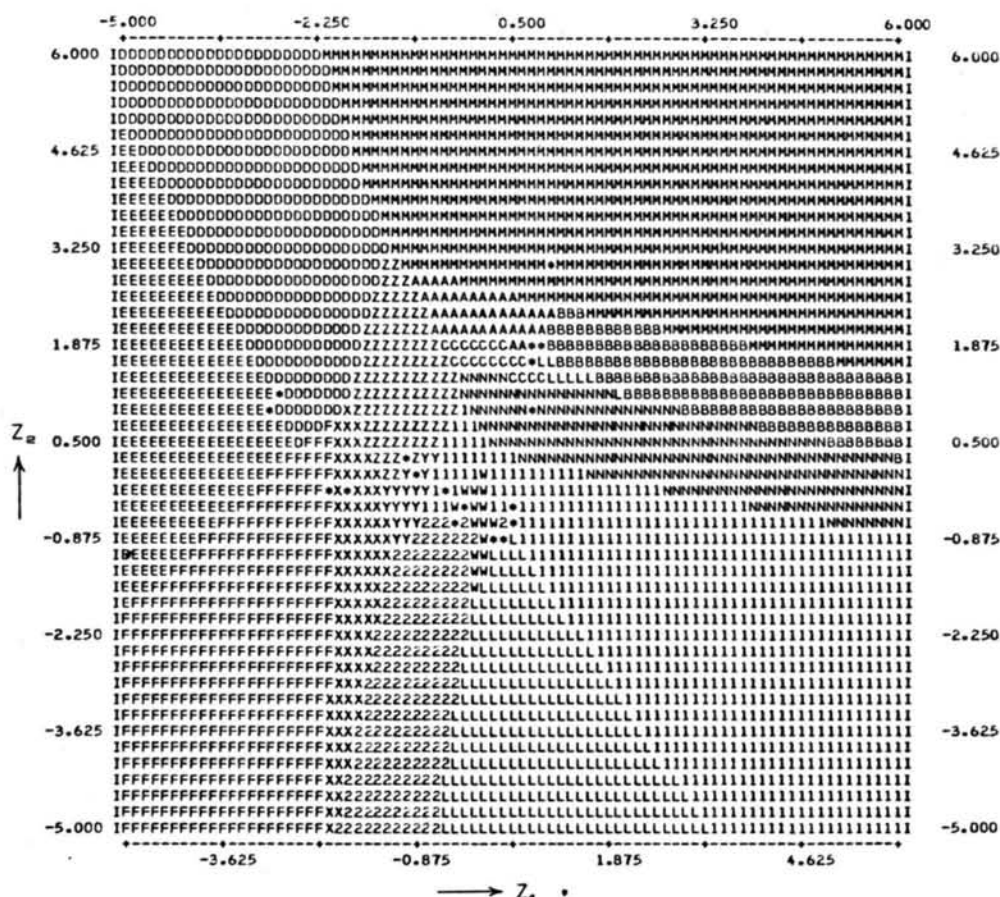


図 55-9 地表クラスの判別得点領域 (T-20)

と、地物分類の目的変数 ψ に対してチャンネルの偏相関係数が大きいことなどの諸条件を満たすものである。一般に説明変数の逐次選択法には変数増加法、変数減少法、変数増減法および変数減増法などがある。ここでは2種の地表クラスにおいて、目的特性とチャンネルの単相関係数の高いチャンネルを取り出し、式(56-1)で定義する F の値を採用尺度とした変数増減法を用いる。

$$F = (b_r^* \psi^2) / (S_{\psi}^{rr} \cdot V_e) \quad \dots\dots\dots (56-1)$$

ここに V_e は回帰式の残差分散、 b_r^* は重回帰式の偏回帰係数、 S_{ψ}^{rr} は偏差平方和・積和行列の逆行列の (r, r) の要素である。この手法において F_{IN} をチャンネルの採用する基準値、 F_{OUT} をチャンネルの破棄するときの基準とすれば、 $F_{IN} = F_{OUT} = 2.0$ として、①6個チャンネルの中から重回帰式 ψ と単相関係数が最も大きいあるチャンネルで、かつ $F > F_{IN}$ の条件を満足す

表 55-9 T-20 の分類結果

[illegible]

(注) 対角線上の抽出率の平均は85.22%

るチャンネル i を選び出し、 y とチャンネル i に対する回帰式の係数を求める。②つぎに、チャンネル i を除いた他のチャンネルの中から 1 変数を加えて重回帰式を作成し、 $F > F_{IN}$ なるチャンネルを見出す。重回帰式で各偏回帰係数の有意性を検定して、 F 値の最小のものが F_{OUT} より小さければ、そのチャンネルを除去する。③上述の②の手順を繰返してチャンネルの選択も除去も行なわれなくなるまで計算する（文献 5. 21）参照）。

これらの手順を用いたアルゴリズムを用いてトレーニング地区の 2 種類ごとの地表クラスについて有効なチャンネルを求めることにした。

変数増減法を適用する標本は T R A - C を使い、9 種の地表クラスの中で 2 種の地表クラス相互間の重相関係数、 F 値などを求め地表クラス相互間の有効なチャンネル番号を F 値の大きい順に求めた。その結果を表 56 - 1 にまとめた。表 56 - 1 (a) は標準化をしない結果、表 56 - 1 (b) は標準

表 56 - 1 (a) クラス間の有効チャンネル（標準化なし）

標 本 数	90	41	46	70	42	36	53	30	52
クラス記号	W	R	G	S	B	*	-	H	T
クラス 名	水と影	楢	緑植生	裸 地	青屋根	白屋根	道 路	瓦屋根	軌道跡
W		9, 7, 11	9, 11, 7	9, 11, 5, 7	3, 7	3, 7, 9, 11	11, 3, 9, 1	11, 7, 5 [○]	11
R			11, 9, 1, 7	3, 9, 7, 5	3, 7, 9, 5	3	9, 7, 3, 11	9, 3	9, 11, 7
G				7, 9, 5, 3	3, 7, 5	3, 9	9, 3, 11	11, 3	11, 3
S					7, 3, 9	5, 7	9	11, 3, 9, 7	11, 3
B						7, 3, 9	5, 3, 9, 11	11, 3, 7	3, 5, 11, 9
*							3, 7	3, 7, 9	3, 7
-								11, 9	9, 3
H									11, 3
T									

表 56 - 1 (b) クラス間の有効チャンネル（標準化あり）

	W	R	G	S	B	*	-	H	T
W		9, 7, 11	9, 11, 7	9, 11, 5, 7	3, 9, 5 [○]	3, 7, 9, 11	11, 3, 9, 1	11, 7, 5 [○]	11, 9
R			11, 9, 1, 7	9, 7, 5	3, 7, 9, 5	3	9, 7, 3, 11	9, 3	9, 11
G				7, 9, 5, 3	3, 7, 5, 11, 9	3, 7	9, 3, 11	11, 3	11, 3
S					7, 3, 9	5, 7	9	11, 3, 9, 7	11, 3 [○]
B						7, 3, 9	5, 3, 9, 11	5, 11, 3	3, 5, 11, 9
*							3, 7, 9	3, 7, 9	3, 7
-								11, 9	9, 3
H									11, 3
T									

化を行なった結果であり、これらのチャンネル番号は有意水準 $\epsilon = 5\%$ を適用したものである。

表 56 - 1 (a) と (b) を比較すると全般的に各地表クラスとも類似しており、標本の標準化の効果は

ほとんどないといえる。そこで、標準化しない場合について説明すると、2種の地表クラス相互間で寄与率の高いチャンネル番号を選び出すと11, 9, 7, 3となる。チャンネル5は裸地と白色系屋根、道路と青屋根、軌道跡と青屋根の分離に寄与する程度である。また、チャンネル番号1は地表クラス相互間に寄与することがほとんどなく、わずかに植生間の分離に役立つにすぎないことがわかる。ここで、植生相互間（稲と緑色植生）の重相関係数とF値を調べると0.859と22.122であった。本研究の分析地区のマッピングの分類項目として稲と緑色系植生（雑草など）を分離することは1つの目的であるためチャンネル1を除外しないことにする。

一方、第5章における各地表クラスの2チャンネルごとの相関散布図（図55-4）からチャンネル5と7の相関が高く、一方が分析に不用に思われた。また、T-9のデータで付表5-8におけるチャンネル5と7の相関係数は0.9096を示し、T-20のデータでも付表5-8からチャンネル5と7の相関係数は0.7865を示している。これらの結果は視覚判定用の散布図における効果をも裏付けたことになる。そこで、チャンネル5と7のいずれかを省略すべく、各地表クラスの有効チャンネルを表56-1から調べるとチャンネル7と5は共存しており、特にチャンネル5の効果は少ないといえる。しかし、青色系屋根と道路のチャンネル選択ではチャンネル5が最も効果のあるチャンネルとして選定されている。道路は幅員も狭く低抽出が予想されるので、チャンネル5は削除しがたい。

以上の結果から今回の分析には全チャンネルを使用することに決定した。

なお、表56-1の○印は変数の除去が生じたものを示している。特に表56-1(a)では1ヶ所以外すべて変数増加法で十分であることを示したことになるので、6チャンネル程度であれば変数増加法でよいといえよう。

5.7 分析地区の実験的分類とその結果

分析地区を画素ごとに、分類するための分類項目としての地表クラスの種類とその標本が決定されたのでCCCTに保管されている全チャンネルを使用してユークリッド距離法、線形判別分析法および最尤法による分類を試みる。

(1) ユークリッド距離法

ユークリッド距離法による分類は地表クラス q の種類 $j(i=1\sim k)$ 、チャンネル $i(i=1\sim n)$ 、標本数 m としたとき、表57-1の地表クラス q_j ごとに x の平均値 \bar{x}_j を定めて、図57-1のユークリッド距離 d から $\min(d_i^{(j)})=d_i^*$ を見出し $E \in q_i$ とする手法である。この手法では地表クラスの出現確率が異なる場合、図57-2の $\bar{x}=(\bar{x}_1+\bar{x}_2)/2$ において分類するため誤判別率が高く、標本分布の形状に対する考慮をなしえないといえる。

表57-1 地表クラスGの変数データ

チャンネル クラス	1	2	-----	n
g_1	$x_{11}^{(1)}$	$x_{12}^{(1)}$	-----	$x_{1n}^{(1)}$
	$x_{21}^{(1)}$	$x_{22}^{(1)}$	-----	
	$x_{m1}^{(1)}$		-----	$x_{mn}^{(1)}$
g_2	$x_{11}^{(2)}$	$x_{12}^{(2)}$	-----	$x_{1n}^{(2)}$
	$x_{21}^{(2)}$	$x_{22}^{(2)}$	-----	
	$x_{m1}^{(2)}$		-----	$x_{mn}^{(2)}$
g_k	$x_{11}^{(k)}$	$x_{12}^{(k)}$	-----	$x_{1n}^{(k)}$
	$x_{21}^{(k)}$		-----	
	$x_{m1}^{(k)}$		-----	$x_{mn}^{(k)}$

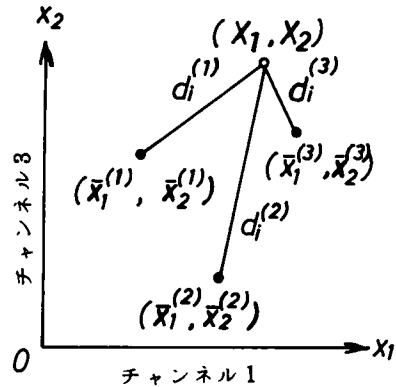


図 57-1 ユークリッド距離 $d_i^{(k)}$

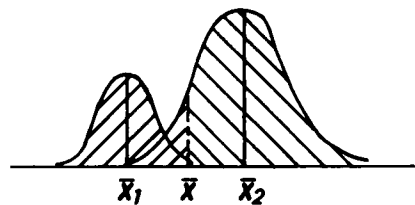


図 57-2 出現確率の異った分布例

(2) 最尤法

最尤法はチャンネル変数 \mathbf{x} が多次元正規分布関数であると仮定し、確率密度関数 $f_j(\mathbf{x})$ を式(57-1)として与える。

$$f_j(\mathbf{X}) = (2\pi)^{-p/2} |\Sigma|^{-1/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mu_j)' \Sigma^{-1} (\mathbf{x} - \mu_j) \right\} \cdots (57-1)$$

ここに、 $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$, Σ = 分散共分散行列とする。
いま q_1, q_2 についてのみ考えると q_1 と q_2 の尤度の対数の差 u_{12} は式(57-2)となる。ここに、 q_1, q_2 は $N(\mu_1, \Sigma_1), N(\mu_2, \Sigma_2)$ に従うものとする。

$$u_{12} = -\frac{1}{2} \{ (x - \mu_1)' \Sigma_1^{-1} (x - \mu_1) - (x - \mu_2)' \Sigma_2^{-1} (x - \mu_2) \} \\ - \frac{1}{2} (\log |\Sigma_1| - \log |\Sigma_2|) \cdots (57-2)$$

したがって、全チャンネル変数空間の決定領域 V_1, V_2 に割り当てるには、式(57-3)による。ここに、 q_{12} は q_1, q_2 の事前確率の比である。

$$V_1 = \{ \mathbf{x} \mid u_{12} > \log q_{12} \} \cdots (57-3)$$

(3) 判別分析法

この方法はチャンネル変数 \mathbf{x} が多次元正規分布をし、各地表クラスの分散共分散行列 Σ が等しいという仮定がある。この方法は5.5.3で述べたので、ここでは省略する。

(4) 地物判定と分類の実施

上記の分類法を下記の実験に適用する時、最尤法はメーカ・ルーチンを、判別関数を求める段階まではSPSSを、その他の分類は自作プログラムを用いた。

なお、前述のT-9、T-20の比較は線形判別分析法を用い、線形判別関数 Z_l の判別能力と抽出精度を比較検討し、 l の採用数を増加させたときの抽出精度の性状をあいまい度の尺度によって調べる。

つぎに、表55-1に示した3種のトレーニング地区による分析地区の抽出精度を比較し、USAS手法を用いた場合の効果を実証するために単チャンネルグレースマップをトレーニング地区切り出し資料にした場合、Ward法のグレースマップをトレーニング地区切り出し資料とした場合の分析地区の分類図をラインプリンタ出力で求め、この分類図内のテスト地区の各画素がいか

5.7.1 判別関数の判別能力と分類精度

判別分析法に用いる線形判別関数 Z_l の判別力を調べるのに固有値 λ_l を式(55-11)の係数ベクトル \mathbf{a} 、地表クラス間の積和行列 \mathbf{B} 、級内積和行列 \mathbf{W} から式(57-4)として求める。

$$\lambda_l = \mathbf{a}' \mathbf{B} \mathbf{a} / \mathbf{a}' \mathbf{W} \mathbf{a} \quad \dots\dots\dots (57-4)$$

さらに λ 、 $\mathbf{T} = \mathbf{B} + \mathbf{W}$ からWilksの A と正準相関係数 R_{cl} は式(57-5)、(57-6)として与えられる。

$$A = |\mathbf{W}| / |\mathbf{T}| \quad \dots\dots\dots (57-5)$$

$$R_{cl} = \sqrt{\lambda_l / (1 + \lambda_l)} \quad \dots\dots\dots (57-6)$$

また、 $\lambda_l / \sum \lambda$ によって判別関係 Z_l の判別能力を百分率表示することもできる。いま、T-9、T-20のトレーニング地区の統計量を用いて上記の判別力の評価値を Z_l ごとに計算すると表57-2となる。T-9の Z_6 はほとんど判別能力がないことになる。また、T-20の判別関数はT-9のそれより判別力のあることが明らかとなった。ところで、 $\lambda_l / \sum \lambda$ の累積判別能力の何%で打切ってよいかという工学的指針は現在のところリモートセンシングデータについて見当らない。そこで、 $l=1$ は常に使用し、 $l=2 \sim 6$ まで採用したときの分析地区の分類結果を

表 57-2 線形判別関数の判別力の評価値

標本の種類 判別関数	T-9			T-20		
	$\lambda_l / \sum \lambda$	R_{cl}	A	$\lambda_l / \sum \lambda$	R_{cl}	A
Z ₁	51.27%	0.964	0.0004	53.03%	0.989	0.0000
Z ₂	25.33	0.931	0.0058	32.38	0.983	0.0002
Z ₃	13.89	0.884	0.0439	7.62	0.933	0.0054
Z ₄	5.24	0.758	0.2014	3.73	0.875	0.0412
Z ₅	4.25	0.723	0.4741	2.14	0.808	0.1761
Z ₆	0.02	0.077	0.9941	1.11	0.702	0.5067

る分類は Z_l 空間座標に地表クラスの重心

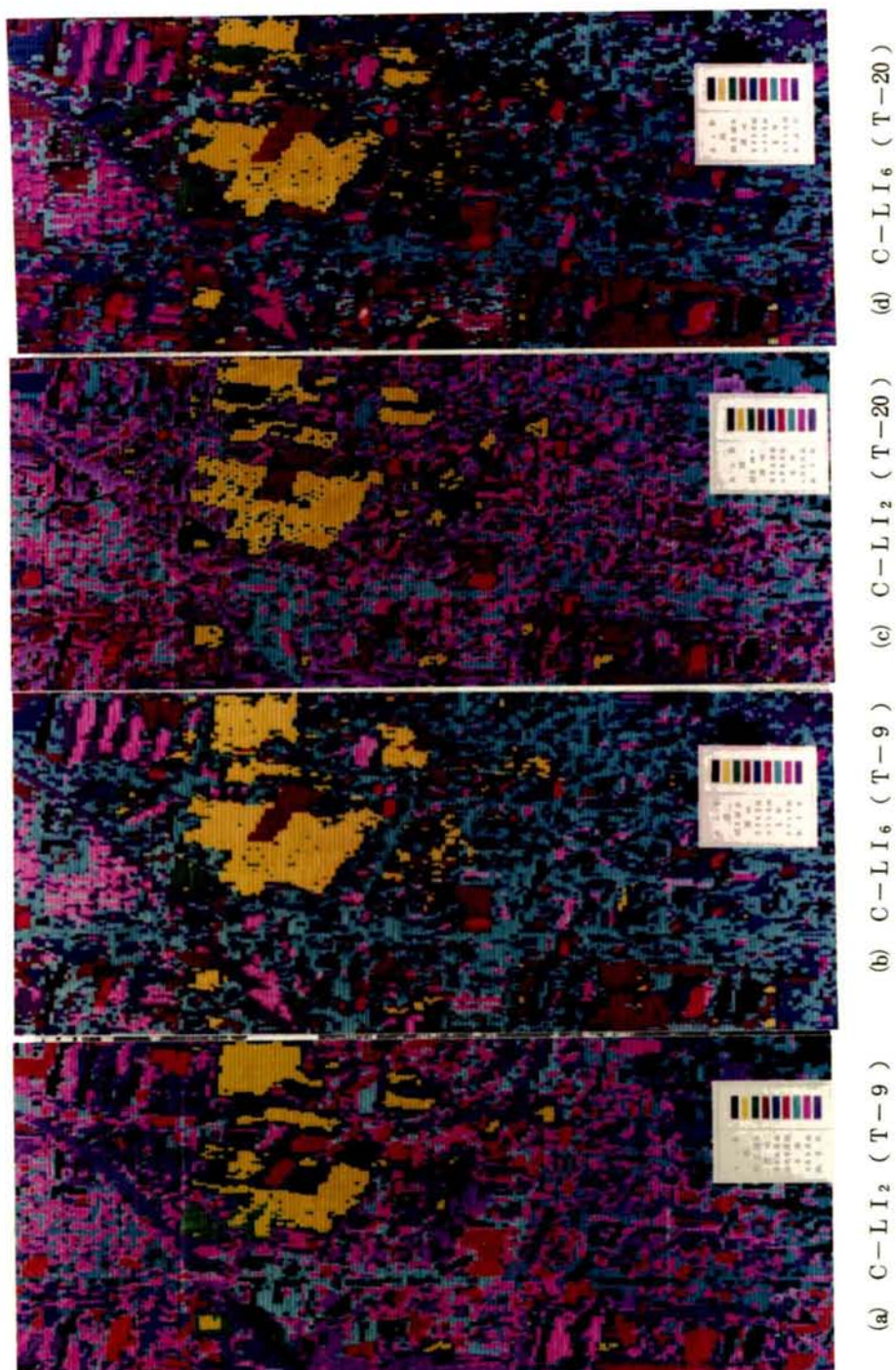


図 57-3 判別関数の採用数 I を変化させたときの分類図

(付表5-10)を与え各画素のチャンネルデータを式(55-11)に代入して各画素ごとの Z が最も近い地表クラス Z_i に割り当てる方法を採用することにした。

この方法によって分析地区の分類図を判別関数の採用数別に求めた($C-LI_2$ の C はトレーニング地区の種類を示し、 LI_2 の LI は判別分析法を意味し、サフィックスは線形判別関数の寄与率の高い方からの採用数を示している)。これらの $T-9$ 、 $T-20$ の10種の中より4種を選んで図57-3の(a)~(b)に示す。これらの分類結果の中で図57-4のテスト地区の分類状態を地表クラスごとに調べ、テスト地区の検証行列要素を計算した。この結果を表57-3に示す。なお、テスト地区のごく一部の地物が線形判別関数の採用数、 $T-9$ と $T-20$ の相違、分類手法の相違などによっていかに変化したかを明らかにするために付表5-11に示しておいた。また、 l を変化させたときのテスト地区の検証行列(表57-3)から通信路行列を求め、第4章で論述したあいまい

表57-3 線形判別関数の採用数別の検証行列要素

NO (1) T-9 (I2)

クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9
g_1	35.	0.	0.	0.	0.	0.	21.	16.	4.
g_2	0.	66.	62.	0.	0.	0.	0.	0.	6.
g_3	0.	145.	51.	0.	2.	0.	0.	0.	5.
g_4	0.	0.	7.	102.	17.	13.	0.	3.	0.
g_5	0.	0.	2.	41.	66.	7.	0.	9.	3.
g_6	0.	0.	0.	9.	4.	68.	1.	3.	0.
g_7	31.	0.	0.	1.	1.	0.	16.	6.	1.
g_8	25.	0.	0.	0.	0.	0.	7.	12.	17.
g_9	2.	0.	0.	0.	0.	0.	3.	0.	60.

$T(G, \bar{G}) = 0.55728 E+00$

NO (6) T-20 (I2)

クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9
g_1	43.	0.	0.	4.	3.	0.	6.	15.	5.
g_2	0.	86.	48.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
g_3	0.	64.	138.	0.	1.	0.	0.	0.	0.
g_4	0.	4.	4.	135.	20.	14.	0.	0.	0.
g_5	2.	0.	1.	75.	32.	2.	0.	12.	4.
g_6	0.	0.	0.	30.	4.	51.	0.	0.	0.
g_7	12.	0.	0.	0.	8.	0.	58.	8.	0.
g_8	32.	0.	0.	0.	0.	0.	48.	1.	10.
g_9	15.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	50.

$T(G, \bar{G}) = 0.56288 E+00$

NO (2) T-9 (L3)

クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9
g_1	65.	0.	0.	4.	0.	0.	7.	0.	0.
g_2	3.	96.	33.	0.	2.	0.	0.	0.	0.
g_3	2.	98.	99.	0.	1.	0.	0.	0.	3.
g_4	0.	0.	8.	104.	19.	41.	1.	0.	4.
g_5	0.	0.	1.	10.	91.	2.	3.	17.	4.
g_6	0.	0.	0.	1.	49.	33.	2.	0.	0.
g_7	13.	0.	0.	1.	1.	0.	62.	0.	6.
g_8	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	80.	9.
g_9	0.	0.	0.	0.	0.	0.	10.	0.	55.

$T(G, \bar{G}) = 0.52364 E+00$

NO (7) T-20 (L3)

クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9
g_1	67.	0.	0.	7.	0.	0.	1.	0.	1.
g_2	1.	76.	57.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
g_3	0.	16.	187.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
g_4	1.	5.	5.	141.	6.	19.	0.	0.	0.
g_5	0.	0.	1.	10.	76.	1.	3.	33.	4.
g_6	0.	0.	0.	13.	21.	51.	0.	0.	0.
g_7	18.	0.	0.	3.	5.	0.	59.	0.	1.
g_8	0.	0.	0.	0.	0.	0.	16.	69.	6.
g_9	3.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	0.	60.

$T(G, \bar{G}) = 0.66819 E+00$

表 57-3 線形判別関数の採用数別の検証行列要素

NO (3) T-9 (\bar{L}_4)

クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9
g ₁	62.	0.	0.	3.	4.	0.	6.	0.	1.
g ₂	4.	98.	29.	0.	0.	0.	0.	0.	3.
g ₃	2.	119.	79.	0.	0.	0.	1.	0.	2.
g ₄	0.	0.	8.	163.	0.	1.	3.	0.	2.
g ₅	0.	0.	1.	0.	121.	3.	2.	1.	0.
g ₆	0.	0.	0.	8.	11.	54.	1.	11.	0.
g ₇	12.	0.	0.	1.	6.	0.	50.	0.	17.
g ₈	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	87.	4.
g ₉	0.	0.	0.	0.	0.	0.	4.	0.	61.

$T(G, \bar{G}) = 0.70471 E + 00$

NO (8) T-20 (\bar{L}_4)

クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9
g ₁	69.	0.	0.	0.	0.	0.	7.	0.	0.
g ₂	1.	73.	60.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
g ₃	0.	14.	187.	0.	0.	0.	0.	0.	2.
g ₄	1.	1.	4.	154.	3.	13.	1.	0.	0.
g ₅	0.	0.	1.	0.	119.	3.	5.	0.	0.
g ₆	0.	0.	0.	6.	20.	57.	2.	0.	0.
g ₇	16.	0.	0.	2.	6.	0.	58.	0.	4.
g ₈	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	72.	19.
g ₉	1.	0.	0.	0.	0.	0.	6.	0.	58.

$T(G, \bar{G}) = 0.73479 E + 00$

NO (4) T-9 (\bar{L}_5)

クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9
g ₁	63.	0.	0.	0.	6.	0.	6.	0.	1.
g ₂	4.	96.	31.	0.	0.	0.	0.	0.	3.
g ₃	2.	124.	74.	0.	0.	0.	1.	0.	2.
g ₄	0.	0.	0.	170.	3.	0.	2.	0.	2.
g ₅	0.	0.	1.	0.	121.	3.	2.	1.	0.
g ₆	0.	0.	0.	4.	14.	59.	1.	7.	0.
g ₇	12.	0.	0.	0.	4.	0.	55.	0.	15.
g ₈	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	87.	4.
g ₉	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3.	0.	62.

$T(G, \bar{G}) = 0.73250 E + 00$

NO (9) T-20 (\bar{L}_5)

クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9
g ₁	71.	0.	0.	0.	0.	0.	5.	0.	0.
g ₂	1.	84.	48.	0.	0.	0.	0.	0.	1.
g ₃	0.	26.	175.	1.	1.	0.	0.	0.	0.
g ₄	1.	1.	4.	152.	6.	11.	1.	0.	1.
g ₅	0.	0.	1.	0.	121.	3.	3.	0.	0.
g ₆	0.	0.	0.	6.	15.	30.	0.	34.	0.
g ₇	18.	0.	0.	2.	7.	0.	13.	0.	16.
g ₈	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	87.	4.
g ₉	1.	0.	1.	0.	0.	0.	4.	0.	59.

$T(G, \bar{G}) = 0.74007 E + 00$

NO (5) T-9 (\bar{L}_6)

クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9
g ₁	63.	0.	0.	0.	6.	0.	6.	0.	1.
g ₂	4.	92.	35.	0.	0.	0.	0.	0.	3.
g ₃	2.	115.	83.	0.	0.	0.	1.	0.	2.
g ₄	0.	0.	0.	170.	3.	0.	3.	0.	1.
g ₅	0.	0.	1.	0.	121.	3.	2.	1.	0.
g ₆	0.	0.	0.	2.	16.	58.	1.	8.	0.
g ₇	12.	0.	0.	0.	5.	0.	54.	0.	15.
g ₈	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	85.	6.
g ₉	0.	0.	0.	0.	0.	0.	6.	0.	59.

$T(G, \bar{G}) = 0.72625 E + 00$

NO (10) T-20 (\bar{L}_6)

クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9
g ₁	71.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	1.
g ₂	1.	86.	46.	0.	0.	0.	0.	0.	1.
g ₃	0.	27.	175.	1.	0.	0.	0.	0.	0.
g ₄	0.	0.	0.	166.	1.	7.	0.	0.	0.
g ₅	0.	0.	0.	0.	118.	9.	1.	0.	0.
g ₆	1.	0.	0.	4.	13.	62.	0.	5.	0.
g ₇	18.	0.	0.	3.	6.	0.	44.	0.	15.
g ₈	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	85.	6.
g ₉	0.	0.	1.	0.	1.	0.	5.	0.	58.

$T(G, \bar{G}) = 0.75519 E + 00$

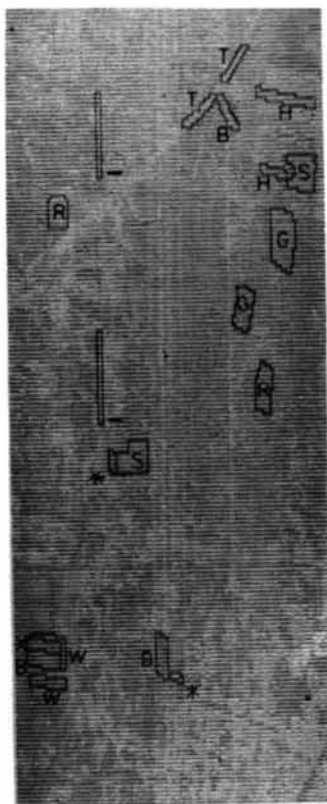


図57-4 テスト地区の分布状態

T-20のテスト地区の分類結果(表57-3)から地表クラスごとの抽出率を求め、 l の採用数の影響とT-9とT-20の比較検討を行なうことにする。

a) 水と影(W) ; 線形判別関数の採用数 $l > 3$ における分類図では抽出数に対する効果はほとんどない。ただ、T-20はT-9より多少高い抽出率を示しており、サブクラスの統合を分類後に行なった方がよい結果となっている。

度の尺度 $T(G, \bar{G})$ を表57-3の下段に示してある。この $T(G, \bar{G})$ を縦軸に判別関数の採用数を横軸にして、図55-1-Bのトレーニング地区と図57-4のテスト地区の地表クラスのデータをT-9(実線●印)、T-20(破線○印)に分けてプロットしたのが図57-5である。この図中の直線表示はトレーニング地区(TRA-A)の分類結果より得られた $T(G, \bar{G})$ である。トレーニング地区のあいまい度の尺度は分類指針である教師自体の評価である。テスト地区のあいまい度の尺度はかなり出現確率の高い、しかも 4×4 画素以上の地表パターンの抽出精度の評価に使用することが、C-LI₆(T-20)の分類図の地物の分類結果と図57-5から明らかとなった。また、図57-5の右縦軸には累積判別能力 $\lambda_0 (= 100 \cdot \sum \lambda_i / \sum \lambda)$ を示したもので、図57-5内に累積判別能力を点線で示している。これらの考察は次節で検討することにし、ここでは各T-9、

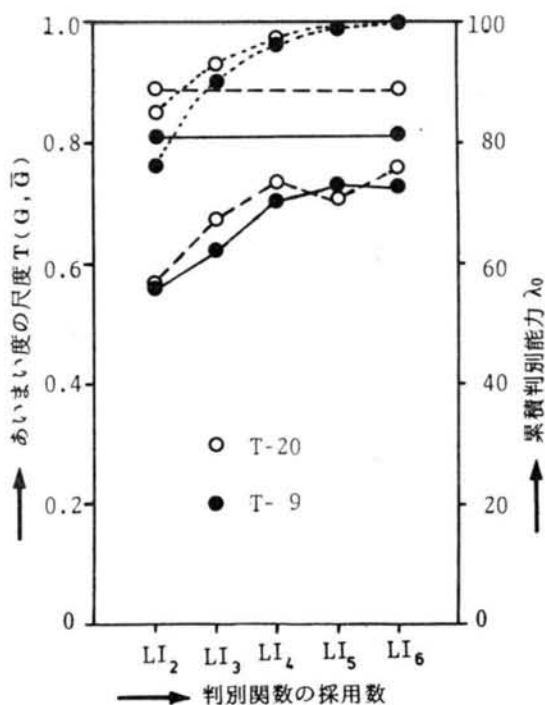


図57-5 $T(G, \bar{G})$ と λ_0 の関係

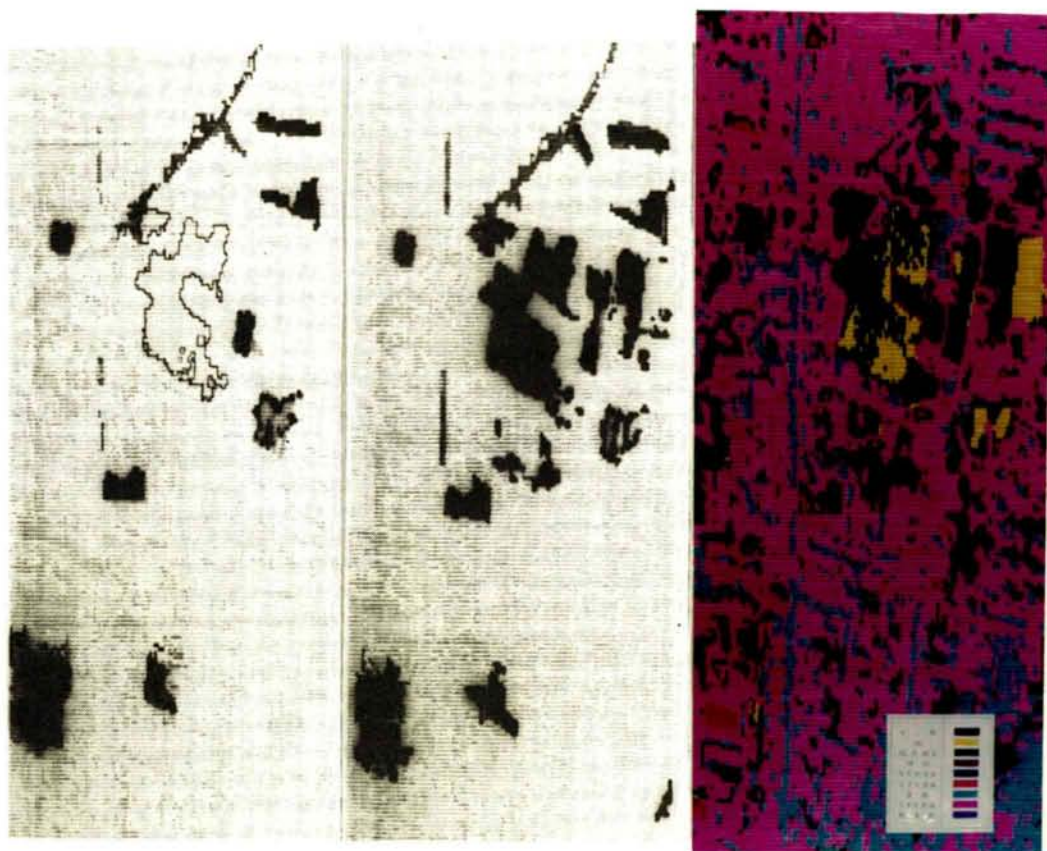
なお、C-L I₆ (T-20) の分類結果では抽出率93%を得ている。

- b) 刈入れ前の稲 (R) : T-9 ではC-L I₃ で抽出数が急増しているが、 $l > 3$ では振動状態を呈している。T-20では $l = 1$ 以外の判別関数の効力がほとんどない。また、T-9, T-20ともに誤分類は緑色系植生に含まれている。
- c) 緑色系植生 (G) : T-9 では標本の半数以上が稲に誤分類されており判別関数の採用数 l の影響は少ない。T-20では稲との分離がよく $l \geq 3$ 以上必要である。
- d) 裸地 (S) : T-9 では $l \geq 4$ で(B), (*) の誤分類がほとんどなくなり正確な分類ができています。T-20はT-9より高い抽出値を得ることはできず、したがって、場所の変化があまり裸地ではないことになる。(T-9, T-20のC-L I₆で96~94%の抽出率を得た)。
- e) 青色系屋根 (B) : T-9, T-20とも $l \geq 4$ で高抽出率を示す。したがって、T-9に対するT-20の影響は分類結果に現われていない(T-9, T-20で95%の抽出率を得ることができた)。
- f) 白色系屋根 (*) : T-9では $l \geq 3$, T-20ではC-L I₅以外で安定した抽出率を示しているが人工建造物の(B), (H)への誤分類を取り除くことが困難のように見受けられる。また、T-20, C-L I₅で抽出率が低下したことから l の採用数の変化に対する抽出率の振動幅が他の地表クラスに比べて大きいと考えられる。ここで注目される現象はまるみをおびた体育館の屋根が反射率の関係で2種のパターンに分けられており、このことから解るように太陽の直下でない傾斜を有する建造物は1種の地表クラスで表現しにくい(T-9, T-20で約73%の抽出率であった)。
- g) 道路 (一) : T-9, T-20による差異、 l の採用数による差異はほとんどないがT-20の $l \geq 5$ で $l = 4, 3$ より抽出率の低下がみられ、抽出率に信頼性がないといえよう。誤分類の地表クラスを調べると(W), (B), (T)であり、(W)は市街地のため建造物の陰影の影響と解釈される。このことは建造物の立ち並ぶ幅員の狭い道路以外ではより高い抽出率が期待できると解釈できよう。
- h) 灰色系屋根 (H) : この分析地区の(H)は平屋の瓦を対象にしたものである。T-9, T-20とも $l \geq 3$ では高抽出率を示し、C-L I₆では約93%の抽出率を得た。
- i) 軌道跡 (T) : T-9, T-20ともに高抽出率を示し $l \geq 4$ では89~95%である。軌道跡は他の地表クラスに誤分類されることは少ないが、他の地表クラスより誤判別される画素が多いことが分類結果から明らかになった。

5.7.2 USAS手法による分類結果とあいまい度の尺度

MSSデータのデジタル解析手法として5.2 に述べたUSAS 手法の効果を調べるために、USAS手法を全く使用しない単チャンネルグレースマップをトレーニング地区切り出し資料として図55-1のトレーニング地区(TRA-A)を使用する場合、USASの第1段階^(手法)を使用して図55-1のトレーニング地区(TRA-B)を使用した場合およびUSAS手法のトレーニング地区(TRA-C)を使用した場合のおおのの分類図を作成し、テスト地区で比較検討してみる。

TRA-Aのトレーニング地区を適用してLARSYSの最尤法を用いて分析地区を分類した結果を図57-6(A-ML)に示し、テスト地区の検証行列要素を求めた。同様に、PIAの線形判別分析法、ユークリッド距離法を用いて分析地区を分類した結果を図57-6(A-LI),



A-LI

A-EU

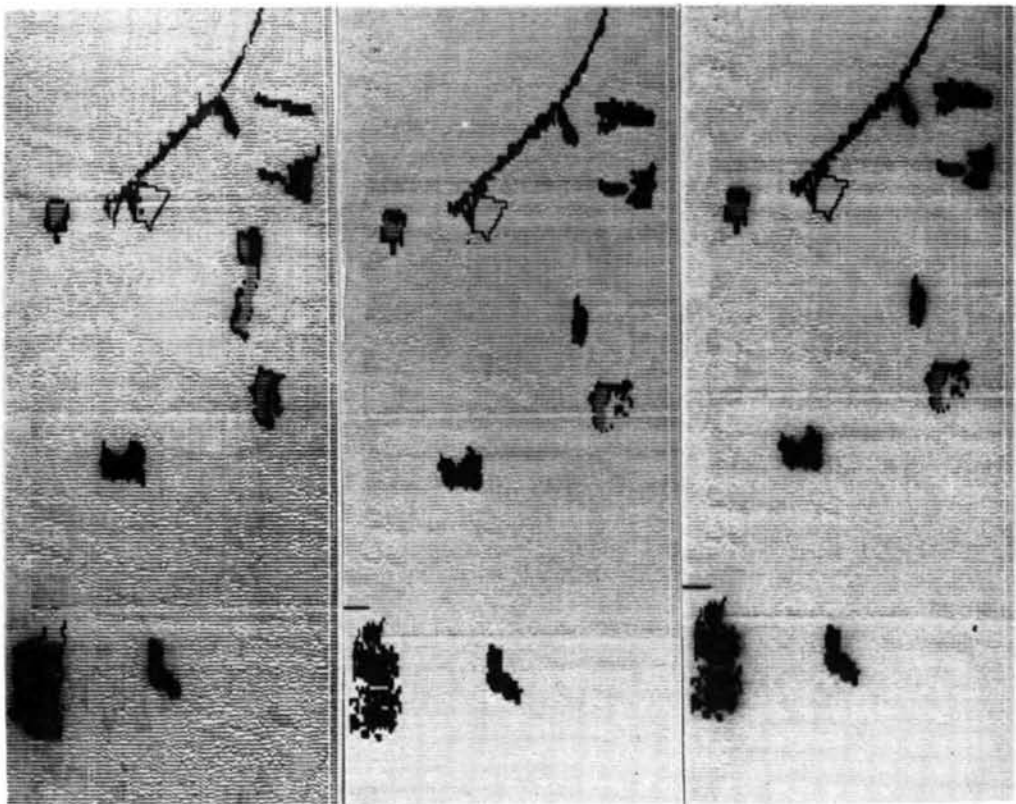
A-ML

図 57-6 分析地区の分類結果 (TRA-A 使用)

表 57-4 テスト地区の検証行列要素 (TRA-A使用)

C-EU (T-9)									
クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9
g_1	59.	0.	0.	0.	2.	0.	15.	0.	0.
g_2	2.	81.	51.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
g_3	2.	126.	72.	0.	0.	0.	0.	0.	3.
g_4	0.	5.	6.	105.	6.	51.	1.	0.	3.
g_5	0.	0.	1.	9.	105.	4.	7.	0.	2.
g_6	0.	0.	0.	17.	6.	62.	0.	0.	0.
g_7	14.	0.	0.	0.	6.	0.	64.	1.	1.
g_8	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	79.	12.
g_9	1.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	0.	62.
$T(G, \bar{G}) = 0.66229 E+00$									

C-EU (T-20)									
クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9
g_1	67.	0.	0.	5.	0.	0.	4.	0.	0.
g_2	1.	86.	47.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
g_3	0.	27.	175.	1.	0.	0.	0.	0.	0.
g_4	0.	4.	8.	147.	12.	6.	0.	0.	0.
g_5	0.	0.	1.	30.	88.	3.	6.	0.	0.
g_6	0.	0.	0.	19.	7.	59.	0.	0.	0.
g_7	15.	0.	0.	7.	1.	0.	59.	0.	4.
g_8	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	79.	12.
g_9	2.	0.	1.	0.	0.	0.	2.	0.	60.
$T(G, \bar{G}) = 0.68839 E+00$									



B-LI

B-EU

B-ML

図 57-7 分析地区の分類結果 (TRA-B使用)

表 57-5 テスト地区およびトレーニング地区の検証行列要素 (TRA-B 使用)

B-LI

	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9	\bar{g}_{10}	\bar{g}_{11}
g_1	44.	0.	0.	0.	0.	0.	11.	0.	0.	21.	0.
g_2	0.	83.	50.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.
g_3	0.	159.	42.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	0.	0.
g_4	0.	0.	6.	160.	0.	0.	5.	0.	1.	0.	5.
g_5	0.	0.	1.	4.	84.	33.	6.	0.	0.	0.	0.
g_6	0.	0.	0.	5.	38.	37.	5.	0.	0.	0.	0.
g_7	5.	0.	0.	0.	0.	0.	52.	0.	8.	5.	16.
g_8	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	78.	13.	0.	0.
g_9	0.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	0.	59.	2.	2.
g_{10}	38.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.	12.	0.
g_{11}	0.	0.	0.	4.	0.	0.	11.	0.	0.	0.	14.
$T(G, \bar{G}) = 0.68412 E+00$											

B-TRA-LI

クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9	\bar{g}_{10}	\bar{g}_{11}
g_1	81.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.	16.	0.
g_2	0.	301.	31.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
g_3	0.	34.	66.	0.	0.	0.	2.	0.	2.	0.	1.
g_4	0.	0.	1.	197.	0.	0.	12.	0.	1.	0.	26.
g_5	0.	0.	0.	3.	82.	0.	10.	0.	0.	0.	0.
g_6	0.	10.	0.	1.	4.	67.	0.	0.	0.	0.	0.
g_7	0.	0.	0.	0.	0.	0.	44.	0.	0.	2.	0.
g_8	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	63.	0.	0.	0.
g_9	0.	0.	0.	0.	0.	0.	4.	44.	0.	0.	3.
g_{10}	66.	0.	0.	0.	0.	0.	3.	2.	11.	28.	3.
g_{11}	0.	0.	0.	4.	0.	0.	11.	0.	0.	0.	14.
$T(G, \bar{G}) = 0.74226 E+00$											

B-EU

	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9	\bar{g}_{10}	\bar{g}_{11}
g_1	45.	0.	0.	0.	0.	0.	17.	0.	1.	12.	1.
g_2	0.	77.	56.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.
g_3	0.	150.	50.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	2.
g_4	0.	5.	8.	78.	2.	76.	0.	0.	0.	0.	8.
g_5	0.	0.	1.	2.	78.	34.	7.	0.	0.	0.	6.
g_6	0.	0.	0.	3.	37.	39.	0.	0.	0.	0.	6.
g_7	5.	0.	0.	0.	1.	0.	54.	0.	5.	13.	8.
g_8	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	81.	10.	0.	0.
g_9	0.	0.	0.	0.	0.	0.	3.	0.	60.	2.	0.
g_{10}	38.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.	12.	0.
g_{11}	0.	0.	1.	2.	0.	0.	5.	2.	4.	1.	14.
$T(G, \bar{G}) = 0.62847 E+00$											

B-TRA-EU

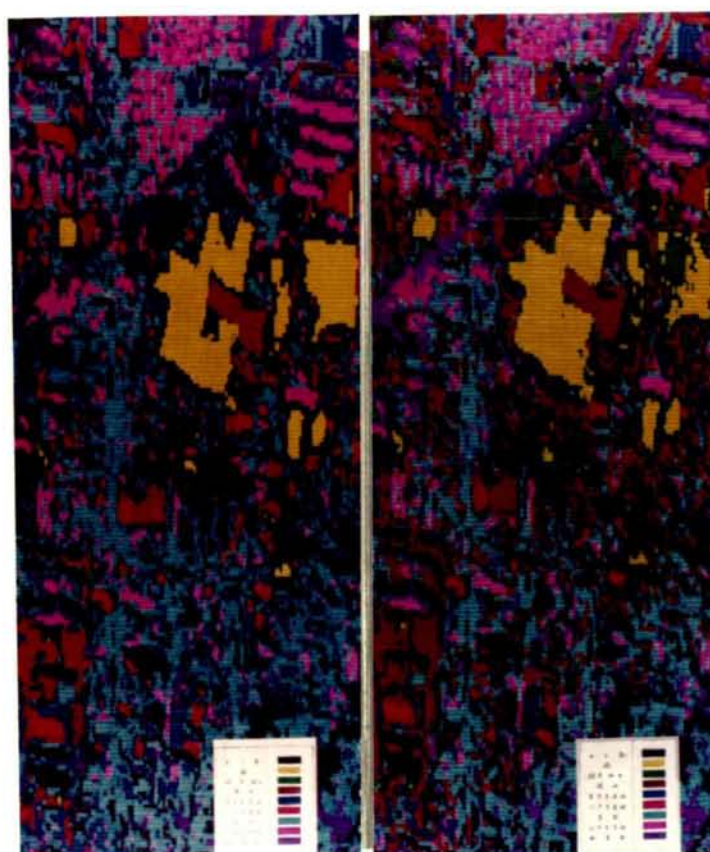
クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9	\bar{g}_{10}	\bar{g}_{11}
g_1	75.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	23.	0.
g_2	0.	295.	37.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
g_3	0.	33.	67.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	5.
g_4	0.	0.	6.	138.	2.	49.	0.	0.	0.	0.	42.
g_5	0.	0.	0.	1.	78.	1.	5.	0.	0.	0.	10.
g_6	0.	10.	0.	1.	4.	67.	0.	0.	0.	0.	0.
g_7	0.	0.	0.	0.	0.	0.	41.	0.	0.	3.	2.
g_8	0.	0.	0.	0.	1.	0.	1.	57.	1.	0.	0.
g_9	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	44.	2.	4.
g_{10}	65.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	8.	30.	9.
g_{11}	0.	0.	1.	2.	0.	0.	5.	2.	4.	1.	14.
$T(G, \bar{G}) = 0.71196 E+00$											

B-ML

クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9	\bar{g}_{10}	\bar{g}_{11}
g_1	48.	0.	0.	0.	6.	0.	0.	0.	0.	17.	5.
g_2	0.	72.	47.	0.	0.	14.	0.	0.	1.	0.	0.
g_3	0.	30.	92.	0.	0.	81.	0.	0.	0.	0.	0.
g_4	0.	0.	6.	151.	2.	0.	0.	18.	0.	0.	0.
g_5	0.	0.	0.	0.	84.	41.	0.	0.	1.	0.	2.
g_6	0.	0.	0.	0.	34.	49.	0.	0.	0.	0.	2.
g_7	10.	0.	0.	0.	10.	0.	54.	1.	5.	3.	3.
g_8	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	64.	27.	0.	0.
g_9	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	62.	1.	1.
g_{10}	38.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	0.	12.	0.
g_{11}	0.	0.	0.	4.	0.	0.	5.	0.	0.	2.	18.
$T(G, \bar{G}) = 0.64892 E+00$											

B-TRA-ML

クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9	\bar{g}_{10}	\bar{g}_{11}
g_1	92.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	5.	1.
g_2	0.	311.	20.	0.	0.	1.	0.	0.	0.	0.	0.
g_3	0.	27.	75.	1.	0.	1.	0.	0.	1.	0.	0.
g_4	0.	0.	1.	206.	0.	2.	0.	0.	0.	0.	28.
g_5	0.	0.	0.	0.	90.	0.	0.	0.	0.	0.	5.
g_6	0.	9.	1.	0.	0.	72.	0.	0.	0.	0.	0.
g_7	0.	0.	0.	0.	0.	0.	43.	0.	0.	0.	3.
g_8	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	58.	2.	0.	0.
g_9	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	1.	48.	1.	1.
g_{10}	56.	0.	0.	1.	2.	0.	0.	1.	9.	43.	1.
g_{11}	0.	0.	0.	4.	0.	0.	5.	0.	0.	2.	18.
$T(G, \bar{G}) = 0.80505 E+00$											



C-EU (T-9)

C-EU (T-20)

図 57-8 分析地区の分類結果 (T R A-C使用)

表 57-6 テスト地区の検証行列要素 (T R A-C使用)

A-L I									
クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9
g_1	57.	0.	0.	0.	0.	0.	19.	0.	0.
g_2	4.	34.	90.	0.	2.	0.	0.	0.	4.
g_3	4.	3.	194.	0.	0.	0.	1.	0.	1.
g_4	2.	25.	5.	143.	0.	0.	2.	0.	0.
g_5	1.	6.	0.	2.	13.	26.	65.	14.	1.
g_6	0.	7.	0.	15.	0.	54.	6.	3.	0.
g_7	5.	0.	0.	0.	0.	0.	49.	2.	30.
g_8	0.	0.	0.	0.	45.	0.	5.	38.	3.
g_9	0.	0.	0.	0.	2.	0.	10.	1.	52.
$T(G, \bar{G}) = 0.59372 E+00$									

A-EU									
クラス	\bar{g}_1	\bar{g}_2	\bar{g}_3	\bar{g}_4	\bar{g}_5	\bar{g}_6	\bar{g}_7	\bar{g}_8	\bar{g}_9
g_1	49.	0.	0.	0.	0.	0.	24.	0.	3.
g_2	7.	20.	98.	0.	0.	0.	1.	1.	7.
g_3	3.	4.	188.	0.	0.	0.	0.	0.	8.
g_4	1.	7.	7.	142.	0.	11.	6.	0.	3.
g_5	1.	0.	0.	52.	0.	12.	39.	21.	3.
g_6	0.	0.	0.	14.	0.	67.	2.	2.	0.
g_7	5.	0.	0.	0.	0.	0.	46.	6.	29.
g_8	0.	0.	0.	1.	27.	0.	2.	55.	6.
g_9	0.	0.	0.	0.	2.	0.	4.	1.	58.
$T(G, \bar{G}) = 0.55288 E+00$									

図57-6 (A-EU) に、テスト地区の検証行列要素を表57-4 (A-LI, EU) に示す。

つぎに、TRA-Bのトレーニング地区を適用してPIAの線形判別分析法、ユークリッド距離法および最尤法を用いて分析地区を分類した結果を図57-7 (B-LI, EU, ML) に、テスト地区の検証行列要素を表57-5 (B-LI, EU, ML) に示す。

また、TRA-Bのトレーニング地区の検証行列要素を表57-5 (TRA-B-LI, EU, ML) に示す。

さらに、TRA-Cのトレーニング地区を適用して、USAS手法のユークリッド距離法を用いて分析地区を分類した結果を図57-8 (C-EU) に、テスト地区の検証行列要素を表57-6 (C-EU) に示す。なお、線形判別分析法の結果については5.7.1ですでに述べてある。

以上の分析地区の分類結果から得られたあいまい度の尺度 $T(G, \bar{G})$ をまとめると図57-9となる。この図は3組に縦割りされており、左側はTRA-Aのトレーニング地区を使用した地表クラス9種である。

中央はTRA-Bのトレーニング地区を使用しており地表クラスは11種類で、 \times , \odot , \square 印はトレーニング地区のあいまい度の尺度 $T(G, \bar{G})$ の値であり、 \triangle , \bullet , \blacksquare 印はテスト地区の $T(G, \bar{G})$ である。

図57-9の右側は図55-1-Cのトレーニング地区を使用し、地表クラス9種であるが地表クラス内のサブクラスとして20ヶ所選定したので分析時にクラス20とし分類図作成時に9種の地表クラスとしたもの (T-20) を \circ 印で表示し、分析時から地表クラスを9種にサブクラスをまとめて分類図を作成したもの T-9 を \bullet 印で表示した。

また、図57-9の上方 \times , \square 印はトレーニング地区の $T(G, \bar{G})$ 、下方 \triangle , \bullet , \circ , \bullet はテスト地区の $T(G, \bar{G})$ である。

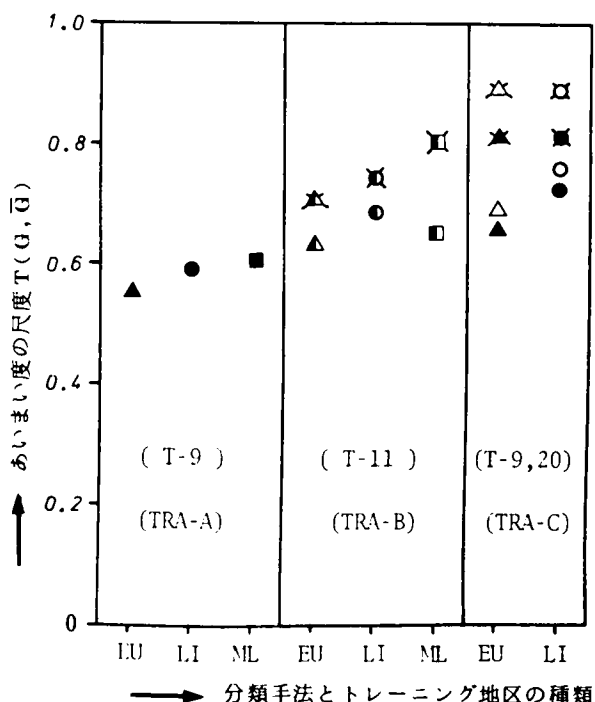


図57-9 分析地区のあいまい度の尺度の比較

5.8 考 察

5.8.1 図形表示適用への考察

判別分析の前処理としてデータ点検と表示法を示し、トレーニング地区の実験データの適用例を図表で示してきた。図形表示によるデータ点検はデータの視覚効果を求めるもので定量的データでは理解し難いデータのバラツキ状態などを研究者にわかり易く示すものである。本章ではトレーニング地区のデータを分析者が十分理解できるように、図形表示システムとして星座グラフ、2軸および4軸法の散布図、非線形な拡大散布図、分光曲線図および放射状ダイヤグラムなどの作図プログラムを開発してきた。これらの作図を用いてクラスと分類項目のデータ比較などを行ってきた。この結果、地表クラスの決定などを行なったので、これらの過程について図面の種類別に考察を加える。

星座グラフは半円形の平面に全チャンネルデータを投影するため、データ数が増加するに従って視覚効果が低下する。この星座グラフから地表クラスの分離性を調べるには、経験的に20以下の地表クラスに適用すべきであり、地表クラスの平均値のみによる表示では百数十種類の表示は可能である。協本の星座法をトレーニング地区のデータに直接適用したとき、表示位置が右寄りとなり実用的でなかった。そこで、半円形全面にデータを散布させるために式(55-3)の ϵ 要素の導入を試み、種々 ϵ を変化させた実験の結果、 $\epsilon=2$ の採用が視覚効果を向上させた。 ϵ の値の選定法は $0 < \epsilon < 1$ に対しては放射輝度の高い地表クラスもしくは地物に適し、 $\epsilon > 1$ に対しては放射輝度の低い地表クラスもしくは地物を表現するのに適している。

4軸法の散布図の座標軸とすべきチャンネルを決定するために2軸直交の散布図をすべて作成し、地表クラスごとのデータのバラツキと地表クラス間の分離性を調べた。この結果から表55-5を作成することにした。

本研究のような分類を試みる場合には表55-5から、 $0.45 \sim 0.50 \mu m$ 、 $0.80 \sim 0.89 \mu m$ 、 $8.00 \sim 14.00 \mu m$ の波長帯の3チャンネルが選定され、他の1軸は $0.55 \sim 0.60 \mu m$ 、 $0.65 \sim 0.70 \mu m$ のいずれかを採用すればよい。ただし、分析地区の地物構成によって、地表クラスや地物を3チャンネルで十分表現できる場合には平面直交3軸表示をすればよい。

非線形な拡大散布図は直交散布図の原点付近に分布する集中したデータの分離効果を向上させる目的で開発したものであるため、星座法や4軸法のグラフから地表クラスを分離できる場合には不用となる。

5.8.2 地表クラスの分類結果の考察

地物の分類をする手法の中には地表クラスごとの分光放射輝度を調査し、各地表クラスのデータ

から閾値を求め、トゥリー法によって分類する方法^{5,29)}もあるが分析地区ごとに閾値と処理手順が変ることが予想されたので、本章では取り扱っていない。また、第4章のコード空間法は記憶容量が多く必要であることから採用していない。5.7で述べたユークリッド距離法、線形判別分析法、最尤法は既存のものであり分類手法を開発したものではないが、U S A S手法の処理過程などの差異や分類結果の良否などを相対的に評価する目的で上記の3分類手法を採用している。

これらの分類手法によって得られた分類結果(表57-3, 4, 5など)から4.4で述べた式(44-11)のあいまい度の尺度 $T(G, \bar{G})$ を算出したので、この $T(G, \bar{G})$ によって、トレーニング地区の選定資料、分類過程における地表クラスのまとめる時期、トレーニング地区とテスト地区の分類結果の比較、分類手法の差異などについて考察を加える。

まず、5.7.1の線形判別関数を判別能力のある順に採用した時の $T(G, \bar{G})$ は図57-5に示してきた。この中でクラス分類の条件 $T-9$ と $T-20$ を比較すると $T-20$ の $T(G, \bar{G})$ の方が約0.8大きかったので、地表クラス内のサブクラスをまとめる時期は分類後にすべきと考える。このことは、表55-8, 表55-9の対角線の抽出率の平均値から評価しえないものである。したがって、地表クラスのトレーニング地区が1ヶ所以上必要とされる場合は複数のサブクラスを選定し、サブクラスごとに分類を行ない、分類図作成時にサブクラスを地表クラスに統一すべきと考える。このことは各地表クラスごとの抽出率からも同様な結果を得ている。ところで、テスト地区は地表クラスの種類があらかじめ既知の場所を選ぶためテスト地区の抽出率が高いことが望ましい。しかし、データの質と調査手法、地表クラスの種類などで高抽出率を望めないこともある。このときはトレーニング地区の抽出率とテスト地区の抽出率の差を少なくすることが必要である。

また、テスト地区の $T(G, \bar{G})$ と累積判別能力 λ_0 の性状は $C-LI_2$ から $C-LI_6$ にかけて同様な傾向を $T-9$, $T-20$ とも示している。このことはトレーニング地区の選定場所が適当であったことを意味していると解釈できよう。ただし、 $T-20$ の LI_5 において $T(G, \bar{G})$ が $C-LI_4$ より低下しているのは不自然である。この理由は白色系屋根(*)が灰色系屋根(H)に誤分類されたため(表57-3の $C-LI_5$ ($T-20$)参照)付表5-11の(*₁)の分類結果からも明らかである。このことから(*₁)はテスト地区として適当でなかったといえよう。

つぎに、5.7.2のトレーニング地区 $TRA-A, B, C$ は分類手法にかかわらず順次あいまい度の尺度 $T(G, \bar{G})$ が大きくなっている。このことは、トレーニング地区の切り出し資料による影響であり、単一グレーマップをトレーニング地区切り出しの資料とするよりWard法による教師なし分類結果を資料とする方が、この分析地区の分類に効果的であったことを意味していると解

積される。また、TRA-BとTRA-Cの差はUSAS手法の第2段階の適用効果を示すものである。

分類手法間について調べるとユークリッド距離法より判別分析法がいずれのトレーニング地区に対しても高い $T(G, \bar{G})$ を示しており、この分析地区の地物を判定するには判別分析法の方がユークリッド距離法より適しているといえる。ところで、最尤法は一般にMSSデータの分類によく使用されているが、その効果は明確に現われておらずTRA-Cのごとき、ある地表クラスの標準偏差が零の場合、現在のプログラムが使用できないという利用制限もある。したがって、図57-9のTRA-CのMLのデータが欠けている。これらのことから最尤法と他の分類手法の比較は困難であるが、上記の利用制限外ではユークリッド距離法より高精度が得られるように思われる。

5.9 結 語

本章では航空機によるMSSデータのデジタル解析を行なう場合の処理システムUSAS手法を提唱し、また、この方法を適用する前処理における記録内容の検討方法について研究を行ない、その実用性を調べるために和歌山県御坊市における家屋・田畑、空地などが混在した土地利用区分がかなり細分化されている地域のMSSデータを用いて地物の分類結果を求めてきた。この実験結果から、USAS手法は分析地区が都市域のような複雑な地物パターンをしている場合でも抽出精度を向上させることができるということ、データの記録内容の検討方法は電子計算機利用に際してマン・マシンシステムで行なうと実質的な効果のあること、などがあいまい度の尺度を用いることによって実証できた。

以下、USAS手法の第1段階および第2段階の処理過程から得られた成果をまとめると下記の事項に要約できる。

1. 地物分類をするために分析地区をチャンネル別にグレースケール表示する前に行なう磁気テープに保管されたデータのダンプは、10進法によるライン・カラムともにスキップ付きの格子状位置のデータ出力が、分析地区単位あるいは画素単位のデータ点検に利用でき、実用的と思われる。
2. 分析地区を決めるために使用されるグレースケールを作成するときに必要な主要項目は使用チャンネルの選定、各チャンネルの記録レベルの区分指定および各区分ごとの表示記号指定などである。チャンネル選定は分析する目的により異なるが、都市域の地物調査に限定するならば $0.45 \sim 0.50 \mu m$ 、 $0.65 \sim 0.69 \mu m$ （または $0.55 \sim 0.60 \mu m$ ）、 $0.80 \sim 0.89 \mu m$ 、 $8.0 \sim 14.0 \mu m$ の波長帯を少なくとも使用すべきと考える。チャンネルデータの区分指定は少なくとも2回に分け、1回目は分析地区の位置の確認のために表53-1に示したレベル

間隔による10区分程度の指定をし、2回目は分析地区内の地物の位置を詳細に表現すると思われる区分指定(閾値処理)が必要と思われる。つぎに、各レベル区分の表示記号(ここではLP出力文字)の選定は10区分程度の区分数では表53-1の記号を用いると視覚効果があった。また、^{5.30)}区分数がさらに多くなるときはLARSYSのLP出力文字が参考になろう。

3. 教師付き分類におけるトレーニング地区に存在する地物の位置確認のための資料として、チャンネル別グレースマップ、パストラジアンズ除去のグレースマップ、チャンネル和のグレースマップ、Median法のグレースマップおよびWard法のグレースマップなどを作成して比較検討したところ、Ward法のグレースマップがこれらの中では最適であった。
4. Ward法によるグレースマップを作成する際のクラスは画素の分光特性から決定されるものであり、分類項目は地物判定をする目的から決定されるものである。この両者の関係を検討でき、さらにトレーニング地区の選定資料にWard法のグレースマップを使用することを考慮に入れるとWard法による教師なし分類をまず行ない、その後、教師付き分類をする手順となることを見出した。
5. USAS手法の処理過程の中でクラスと分類項目を対比するのに画素単位の分光曲線や放射状ダイアグラムを用いて行なうと効果があるということが5.5の実験結果から明らかになった。
6. 画素ごとにMSSの多くのチャンネルの内容の特徴を平面上に表示することは困難とされ^{5.31)}てきたが、この問題は星座グラフを適用すれば解決できる。

ただし、本章で示した星座グラフは単に従来の星座グラフをそのまま適用したのではなく、MSSデータに適応すべく改良を行なったものである。

また、4軸法の散布図やミンコフスキ空間を応用した非線形な拡大散布図は地表クラスを定性的に解釈するもので、地表クラス内もしくは地表クラス間のバラツキとその形状ならびに地表クラス間の重なり具合を観測でき、デジタル量では判断不可能な情報を分析者に与える点は注目に値する。

7. 地表クラス間のチャンネル選択をするために説明変数選択法の中の変数増減法を採用して、地表クラス間の有効なチャンネルを実験的に調べた。この方法を用いると2種の地表クラス間の有効なチャンネルとその順序を見出すことができ、表56-1に示した資料は今後の地物の識別・判定・分類の有効チャンネル選定の参考資料として利用できると考える。また、チャンネル数6程度の使用であれば変数増減法より変数増加法で十分といえ、データの標準化も必要ないことが明らかになった。

8. サブクラスを地表クラスに統合する処理過程の時期は 5.7 の T-9 と T-20 の分類結果によれば分類以前にサブクラスを統合 (T-9) するより、分類後にサブクラスを統合 (T-20) すべきである。
 9. MSS データの記録値から地物を分類する手法として、ユークリッド距離法、線形判別分析法および最尤法の 3 法を用いて、結果を比較してみた。御坊市の分析地区においてはユークリッド距離法より線形判別分析法の分類結果の方が高精度であった。また、最尤法は分散が零の場合やデータ数が数画素で少ない場合に適用することができず、分析に対して上記 3 法の中でも最良な方法といえないので、教師となる統計資料の検査を必要とすることが明らかとなった。^{5,32)}
 10. USAS 手法の処理は、LARSYS や PIA などより分析者の判断する過程が多いため半自動処理となる欠点がある。しかし、5.7.2 の分類手法を変えたときの分類結果や処理過程を異にした分類結果をあいまい度の尺度 $T(G, \bar{G})$ で比較検討したところ、USAS 手法は分析地区の地物分類において分類精度を向上させることができることが明らかとなった。^{5,33)}
- なお、本章に用いた USAS 手法は京都大学大型計算機センターの開発プログラム用として作成されている PARS (Package Program for the Remote Sensing Data Analysis) に応用されている。^{5,34)}

参 考 文 献

- 5.1) Philip H. Swain : "Pattern Recognition: A Basis for Remote Sensing Data Analysis", LARS Information Note LIL572, 1973. 10. p.1 ~ 40.
- 5.2) 福原道一 (他) : "MSS データのデジタル解析による土壌図の作成", 計測自動制御学会リモートセンシングシンポジウム資料, 1976. 11, p.83 ~ 86.
- 5.3) 飯坂譲二, 北村貞太郎 (他) : "LARSYS による土地利用図の作成", 日本国土海洋総合学術診断事業報告書, 1977. 3, p.409 ~ 414.
- 5.4) 長尾真, 福永泰 : "マルチスペクトル航空写真の解析の試み", 電気学会関西支部連合大会概要集, 1974, p.s.57.
- 5.5) 太隅昇 (他) : "数値的地域区分法: N T A P - Numerical Techniques for Areal Partition-", 日本統計学会予稿集, 1976. p.21.
- 5.6) 前出 4.27) p.33 ~ 36.

- 5.7) M. R. Felix : "The Earth Resources Interactive Processing System" ; IBM, h74-0010R, 1974, p.1 ~ 29.
- 5.8) 前出 5.1) p.32.
- 5.9) 星 仰 : "CCCTデータの判別分析用前処理と表示システム," 土木学会年次学術講演会講演概要集 IV, 1977. 10. p.133 - 1 ~ 2.
- 5.10) 日本国土海洋総合学術診断委員会 : "M S S PRE - PROCESSING SYSTEM報告書, 1975. 9, p.4 ~ 7.
- 5.11) A. N. Williamson : "Interpretation of Multispectral Remote Sensor Data", J. S. M. D, Su2, 1974. 11, p.143 ~ 153.
- 5.12) 星 仰 : "航空機によるM S Sデータのチャンネル演算処理," 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 1977. 4, p. IV 24-1 ~ 2.
- 5.13) E. B. MacDougall : "Computer Processing for Spatial Problems", Arnold, 1976, p.64 ~ 97.
- 5.14) 星 仰 : "航空機によるM S Sデータ処理の基礎プログラム - ヒストグラムとデジタルマップ -, " 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 1976. 5, p. IV 45-1 ~ 2.
- 5.15) 星 仰, 川崎敏 : "二三の判別関数によるM S Sデータ分析 - 御坊市内の地物判別 -, " 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 1977. 5, p. IV 25-1 ~ 2.
- 5.16) 前出 5.12) p. IV 24 - 2.
- 5.17) 前出 2.39) p.37.
- 5.18) A. C. Armstrong : "The Relative Performance of Some Unsupervised Clustering Techniques for the Per-field Classification of LANDSAT Data", Journal of the British Interplanetary Society, Vol. 30. 1977, p.168-171.
- 5.19) D. Wishart : "An Algorithm for Hierarchical Classification Biometrics", 1969. 3, p.165 ~ 170.
- 5.20) 矢島敬二 : "クラスタ・アナリシス(1)," オペレーションズ・リサーチ, 1971. 7, p.56~64.
- 5.21) 奥野忠一(他) : "統多変量解析法," 日科技連, 1973. 3, p.207 ~ 210.
- 5.22) W. J. Dixon : "Biomedical Computer Programs", Univ. of California Press, 1975, p.307 ~ 353.
- 5.23) 前出 5.19) p. IV 25-1.
- 5.24) 脇本和昌 : "Graphical Method による多次元データ解析," 文部省特定研究報告, p.3~4.

- 5.25) Shreider (松野・山崎訳) : “距離空間と信号空間,” 東京図書, 1969. 6, p.34 ~ 46.
- 5.26) 三宅一郎(他) : “SPSS統計パッケージII 解析編,” 東洋経済新報社, 1977. 9, p.242.
- 5.27) 星 仰, 森忠次 : “判別関数によるカラー航空写真のテキスト解析 — 形状, 寸法を考慮した場合の効果 —”, 日本写真測量学会学術講演会発表論文集, 1977. 5, p.33 ~ 34.
- 5.28) 宇山親雄(他) : “多変量解析法による活性骨髄分布の血球産生能指標としての意義付け,” 医用電子と生体工学, 第15巻, 1977. 4, 2a-A-6.
- 5.29) 村井俊治(他) : “リモートセンシングデータを用いた自動分類の数学的手法とその性能テスト,” 日本写真測量学会学術講演会発表論文集, 1977. 5, p.35 ~ 40.
- 5.30) 日本IBM : “LARSYS画像処理プログラム概説書,” GE 18-5080-1, p.49.
- 5.31) 前出 5.1) p.27.
- 5.32) 建設省国土地理院 : “人口急増地域防災市街地計画調査 — リモートセンシングによる土地利用解析手法の研究,” 1977. 3, p.57.
- 5.33) 星 仰 : “航空機によるMSSデータの処理システム(USAS)とその適用に関する研究,” 土木学会論文報告集, 投稿中。
- 5.34) 星 仰, 鳥井清司・松尾芳雄・北村貞太郎 : “リモートセンシングデータ処理システム(PARS)(I)パッケージシステム,” 日本国土海洋総合学術診断事業報告書, 1978. 投稿中。

第6章 結 論

地表を覆っている森林、土壌、各種人工構築物などを上空から調査し、センサーに届く電磁波エネルギーの差異のみから地物の種類を識別し分類・判定することは各地表物体の形状・寸法・キメ・分布状態および相互の位置の関係などの地物判定要素を加味していないため、^{6.1)~6.4)}高精度の分類結果あるいは詳細な地物の分類は困難である。

しかしながら、地物の放射・反射輝度の差異は地物の種類や性質を判定するための基本的要素であることは確かであり、地物の放射・反射輝度の記録を用いた地物分類の方法を改善することが、今後の航空機のMSS調査にとって重要である。

そこで、本論文は第2章で地物の放射輝度の理論を、第3章で地物の位置関係について述べた。また、第4,5章ではMSSデータを用いて定性的地物判定による地物分類法と定量的処理による地物分類法を論述し、これらは地物判定として最も重要となる事項として取り扱われてきた。これらの各章で得られた成果は各章の結語で述べたので本論文の成果の総括を下記に述べる。

1) 航空機によるMSSデータはチャンネル数が一般に多いので、分析地区を含む調査地域の全容を1枚の画像で観察するには、チャンネル演算を行った結果を画像とする方法が実用化されている。しかし、このチャンネル演算式は多種の組合せがあり、特に地物判定用の指針が必要であった。第4章の分析地区(TEST-1)ではチャンネル番号7, 9, 11, ($0.65 \sim 0.69 \mu m$, $0.80 \sim 0.89 \mu m$, $8.0 \sim 14.0 \mu m$)の和が最適であることを実験の結果から見出した。この結果は今後の地物判定用の画像作成の指針となろう。また、2.4.2の式(24-28)はチャンネル演算の一般式であるから、チャンネル演算の汎用プログラム作成に役立つ。

2) 第3章の画素位置の偏位量の関係式は位置合せに利用するものである。ただし、この位置の偏位量を算出する式を用いて画像の位置補正を行っていない。その理由は本研究のMSS画像は判読用に用いたもので位置の高精度を必要としないこと、厳密補正をしても地物の判読に影響が少ないこと、MSS調査から画像作成までの迅速性に欠けることなどによる。

しかしながら、MSS画像を用いて地物の位置を高精度に求める必要がある場合には地物の位置の偏位量を正確に補正する実用的方法の開発が必要であり、これらは今後の研究課題である。

3) MSSデータをデジタル解析して地物を分類するためには、分析地区の地物配置の概要が、充分分析者に理解されていなければならない。しかもデジタル解析を実施すべきかどうかの判断や地物の分類をする場合の予測などが行なえるためには、画像化された資料によって、像と地物との対応関係が明確とならなければならない。このようなことが簡便に実行できれば、地物

判断の根拠の信頼性が向上し、分類結果の精度・向上が期待される。その方法としてカラー合成写真の判読法を提案した。

まず、カラー合成写真を作成し、それにより地物を判読し地上との対比を行なう過程では、基本的な分類項目に属する地物ごとの色調差が存在し、かつその分布状態を理解することが必要である。このことがリアル・フォールス・シェードウカラー合成写真を用いると可能であるということが解った。

なお、雲の影の位置はフォールスカラー合成写真を用いると判読が容易で、その方法はリアル・シェードウカラー合成写真との色調差でわかる。雲の影響のない分析地区では色調コード空間法を適用すれば、稲、土壌、緑色系植生、人工構築物および水域程度の地表クラスならば4.5の結果から充分実用性があるといえる。

つぎに、情報理論を用いたあいまい度の尺度の理論を述べ、この尺度の実用性を調べる目的で色調コード空間法による分類結果のデータに適用してみた。この結果、4.5の考察で述べたように、あいまい度の尺度が分類結果の評価尺度として適用できることが明らかになった。そこで、このあいまい度の尺度 $T(G, \bar{G})$ を第5章のデジタル解析結果にも適用したところ、分類過程や分類手法の差異による結果の良否を一つの尺度で表わすことができた。このあいまい度の尺度によって、本研究のカラー合成写真の判読法とデジタル解析(USAS手法)の分類結果を比較すると下記のことがいえる。

MSS画像より作成したカラー合成写真 P_{MSS} を用い、色調コード空間法を適用して稲、土壌、緑色系植物、人工構築物および水域を分類した結果に対しての $T(G, \bar{G})$ が0.6程度の値を得ることができれば、本稿の作成法によるCCTカラー合成写真 P_{CCT} を用いた場合には $T(G, \bar{G})$ は0.9以上の値を得ることができる。さらに、CCTデータを用いて、USAS手法を適用して判別分析法を使用するならば、トレーニング地区で $T(G, \bar{G})$ は0.9近くとなり、テスト地区で0.75程度となる。これらの $T(G, \bar{G})$ の値は分析地区を変えた場合に当然変化するものであるが、各方法別のあいまい度 $T(G, \bar{G})$ の値は当然、 $P_{CCT} > P_{MSS}$ およびトレーニング地区>テスト地区という傾向を有する。

なお、本研究に使用したMSS記録はわが国における初期段階のものであって、雑音、安定性、感度、飛行条件などについてかなり欠点を有する。それから約3年後の現在においては、これらの欠点が急速に除かれてきているので、同一手法を用いても分類結果や地物判定により高精度が期待できる。したがって、土木事業の計画段階において、迅速に地表の存在物を知る必要性を生じたときには、ここで示した方法が実用できると確信している。

最後に、本研究を遂行するに当り御協力下さった京都大学教授三根久先生，同教授長尾真先生，和歌山工業高等専門学校教授雨宮広二先生，同教授田中光先生，京都大学助教授北村貞太郎先生，同助教授片山徹先生，同助手宇山親雄氏，同助手岡本厚君，同助手渡辺正信君，同技官赤松慎市君ならびに日本国土海洋総合学術診断委員愛甲敬氏，同委員古賀真嗣氏に対してお礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 6.1) 坂井利之，長尾真（他）：“濃淡図形からの線要素の抽出とパターンの認識，” 情報処理，Vol.10. No.3, 1969.5, p.132～142.
- 6.2) 長尾真，松山陸司，池田義雄：“マルチバンド航空写真の解析，” 情報処理学会イメージプロセッシング研究会資料，1977.1, p.1～9.
- 6.3) 麻田治男，森健一（他）：“会話画像処理システム — TOSPICS —，” 電気通信学会パターン認識と学習研究会資料，1975. PRL 75-51.
- 6.4) 星 仰：“航空機によるM S Sデータの視覚表示システム — 境界線表示 —，” 土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅳ，1976.10. p.72～73.

付 録



付写 4-1 河川(1)



付写 4-2 河川(2)



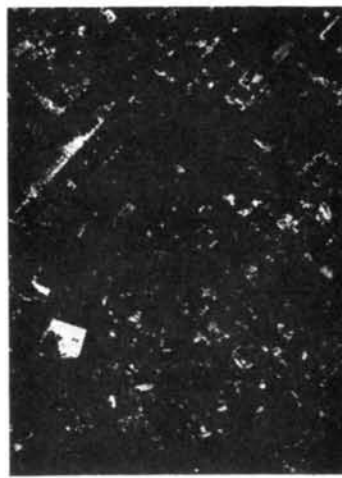
付写 4-3 道路(1)



付写 4-4 道路(2)



付写 4-5 青屋根



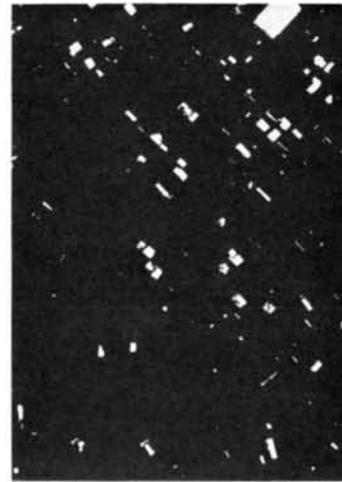
付写 4-6 淡緑植生



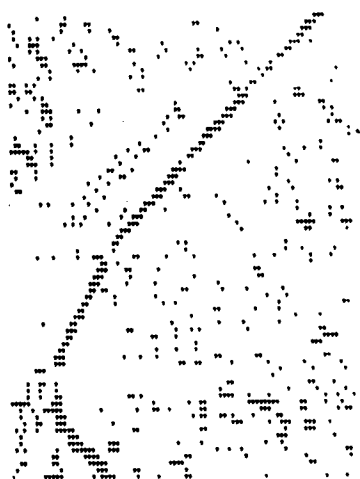
付写 4-7 濃緑植生



付写 4-8 赤屋根



付写 4-9 白屋根



付図 4-1 河川(1)



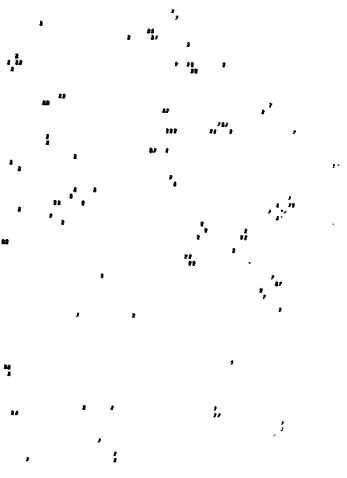
付図 4-2 河川(2)



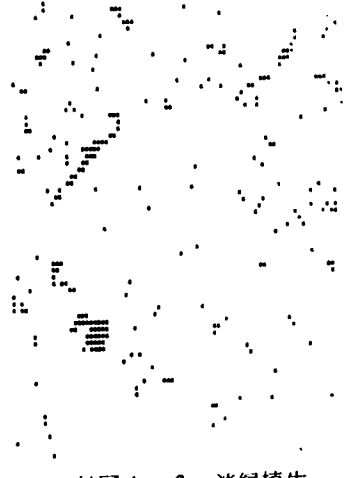
付図 4-3 道路(1)



付図 4-4 道路(2)



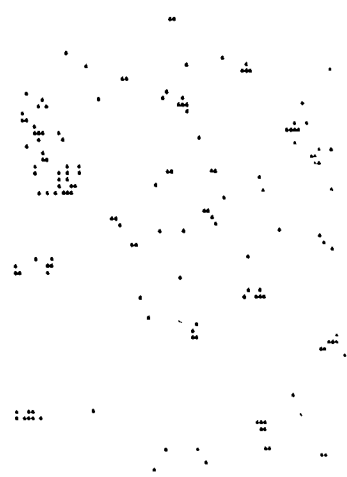
付図 4-5 青屋根



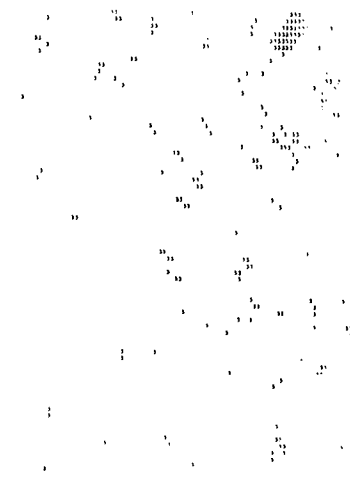
付図 4-6 淡緑植生



付図 4-7 濃緑植生



付図 4-8 赤屋根



付図 4-9 白屋根

付表 4-1 n_{ijg} の分布[illegible]

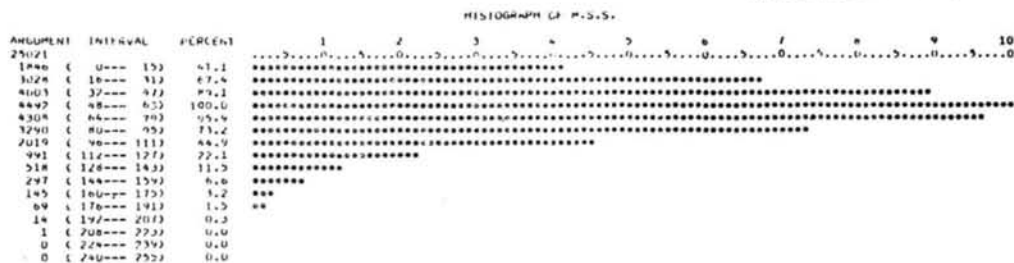


付図5-1 グレーマップ(USAS使用:11チャンネル)

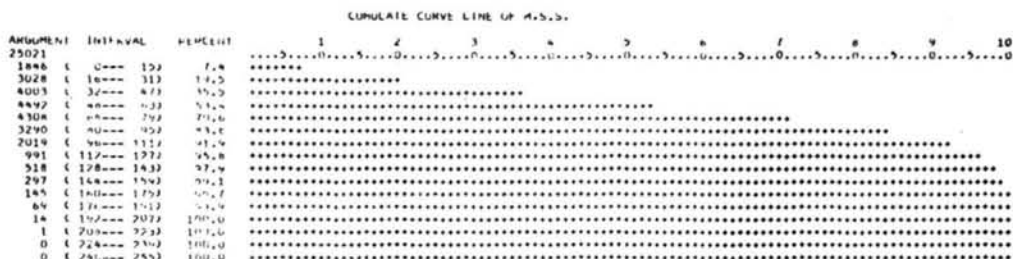


付図 5-4

Ward法 (8クラスタ)

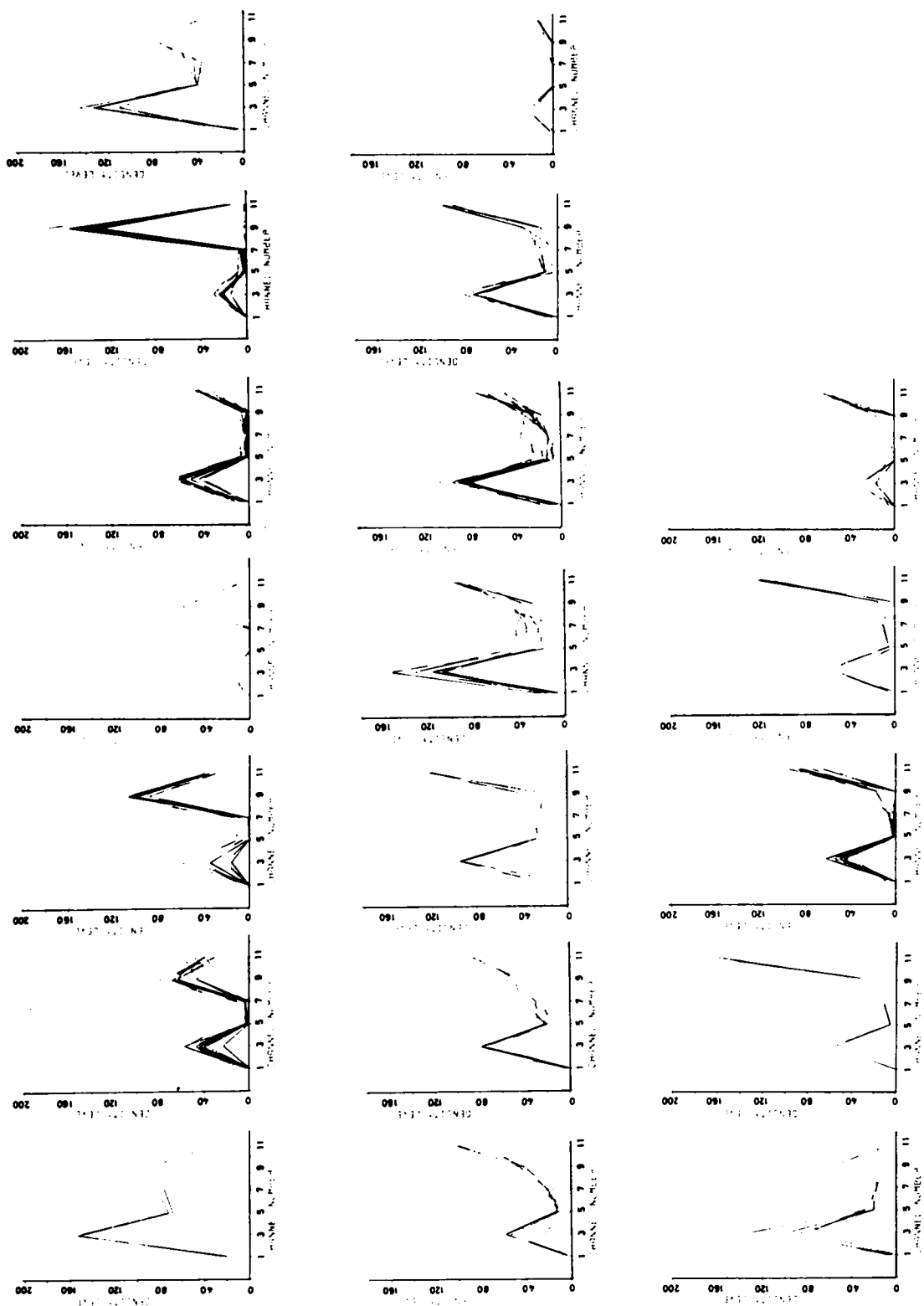


付図5-2 ヒストグラフ（付図5-1のデータ分布より）

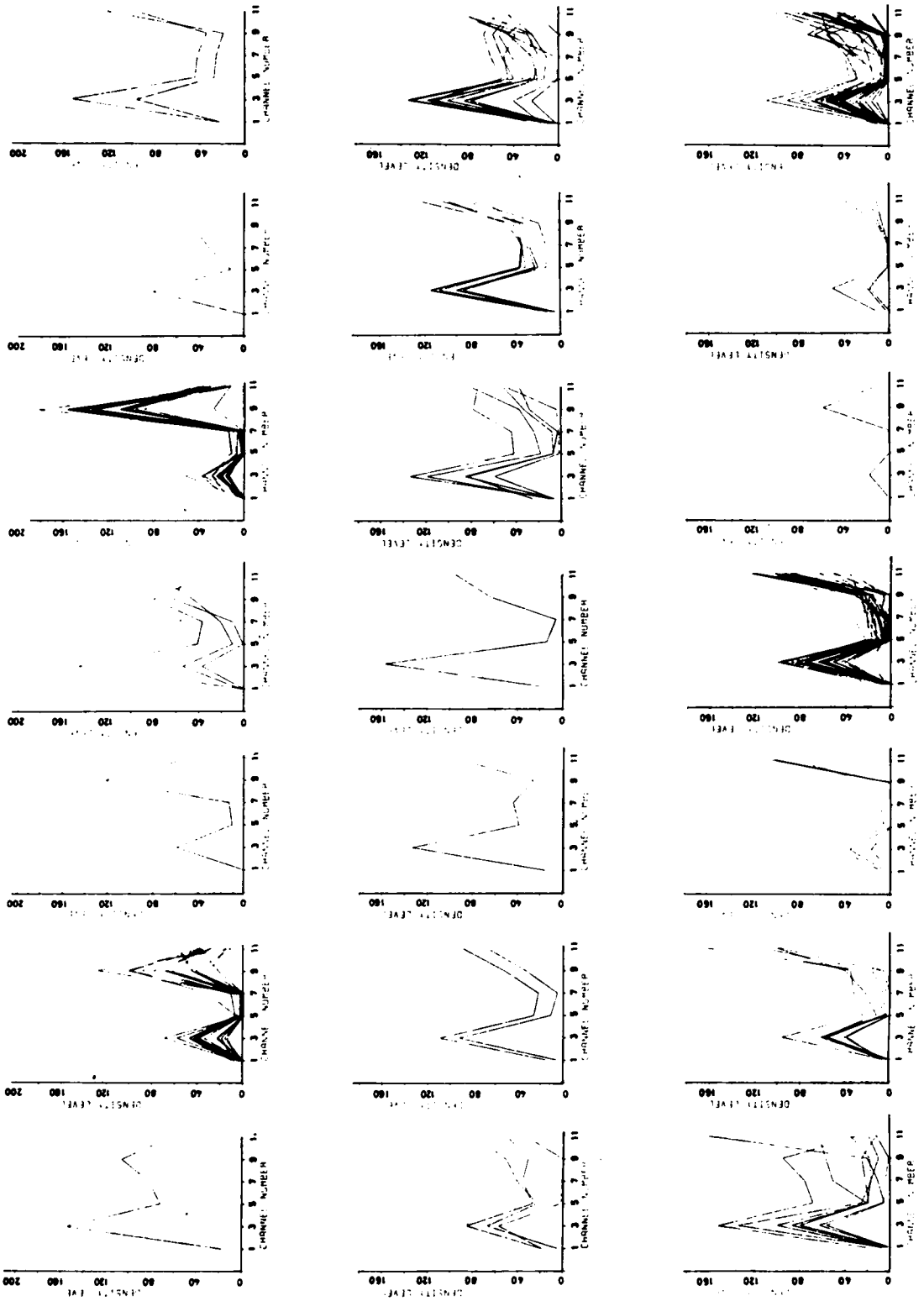


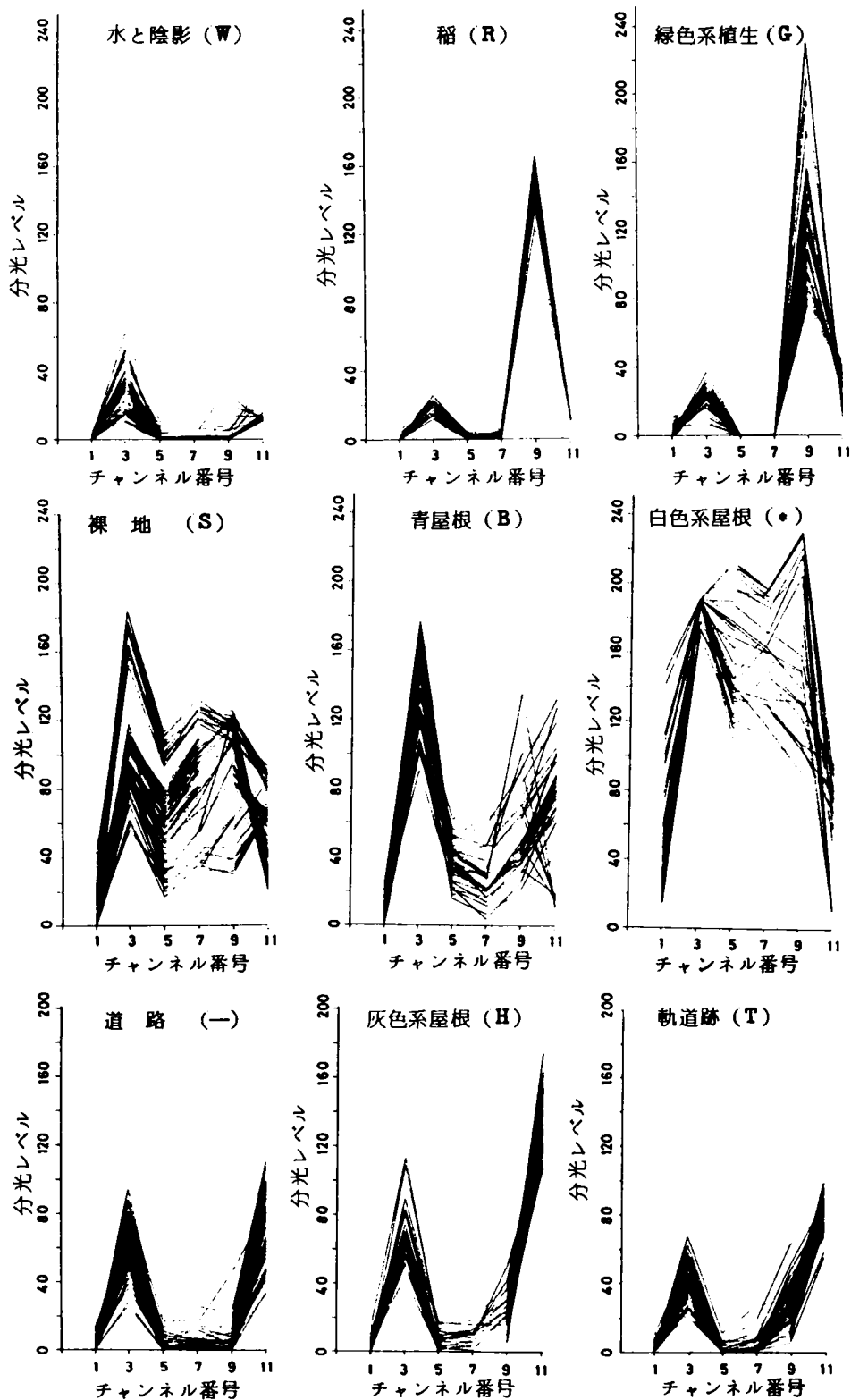
付図5-3 加積分布グラフ（付図5-1のデータ分布より）

付図5-5 Ward法の各クラスタの分光曲線

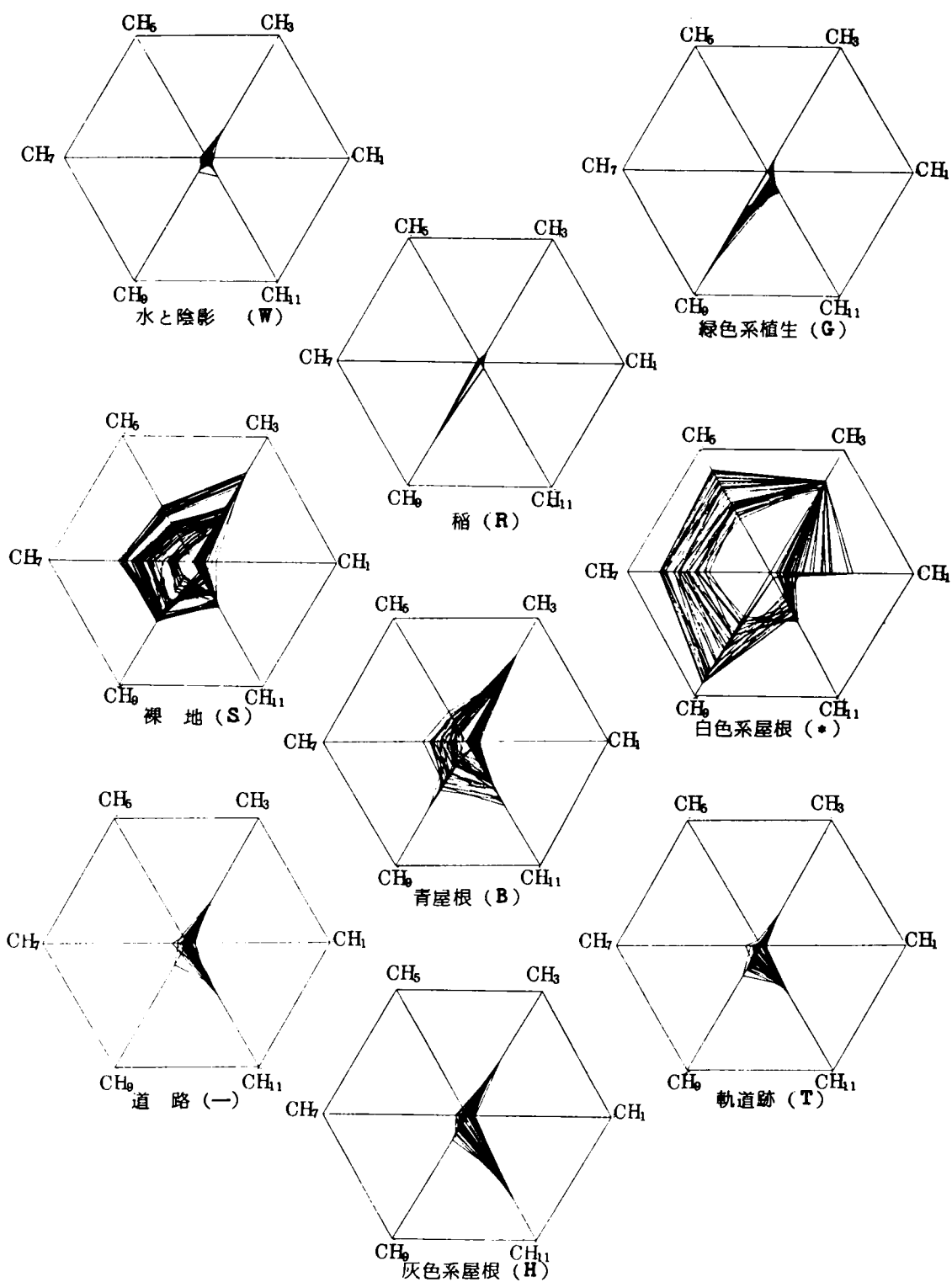


付図 5-6 Median 法の変クラスタの分米曲線





付図5-7 分類項目別の分光曲線



付図5-8 放射状ダイヤグラム

付表 5-4-1 各クラスの標本数 (T-9)												
項	II	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	q ₅	q ₆	q ₇	q ₈	q ₉	Σq	
標本数	90,000	41,000	46,000	70,000	42,000	36,000	53,000	30,000	52,000	460,000		

付表 5-5-1 各クラスの波長域別平均値 (T-9)												
項	II	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	q ₅	q ₆	q ₇	q ₈	q ₉	Σq	
φ	(H ₁)	1,400	0,536	2,717	7,987	10,023	52,000	3,243	4,167	1,326	7,589	
φ	(H ₃)	25,622	18,170	21,804	106,571	134,428	188,278	59,075	69,267	40,408	67,980	
φ	(H ₅)	0,755	1,249	0,0	61,514	36,119	162,611	2,868	7,333	1,364	26,608	
φ	(H ₇)	0,978	2,698	0,108	82,214	33,333	164,889	4,168	10,200	3,921	30,482	
φ	(H ₉)	2,267	149,390	140,434	92,057	52,619	175,222	6,056	24,100	24,576	65,376	
φ	(H ₁₁)	13,088	11,024	27,500	55,687	74,231	56,027	71,415	137,333	82,280	52,410	

付表 5-6-1 各クラスの波長域別標準偏差 (T-9)												
項	II	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	q ₅	q ₆	q ₇	q ₈	q ₉	Σq	
φ	(H ₁)	2,402	1,120	2,864	8,186	6,845	37,187	3,407	4,150	2,195	17,362	
φ	(H ₃)	11,741	4,328	6,725	33,719	24,187	5,784	14,453	16,250	10,676	54,409	
φ	(H ₅)	1,837	1,510	0,0	26,214	10,647	31,067	3,228	4,424	2,876	47,508	
φ	(H ₇)	2,367	2,022	0,317	31,132	17,248	27,607	5,217	5,428	5,352	50,842	
φ	(H ₉)	5,419	8,529	48,008	29,803	24,796	46,861	7,717	10,585	11,461	66,132	
φ	(H ₁₁)	4,896	0,156	9,064	21,637	31,859	34,654	23,606	17,429	9,962	39,202	

付表 5-4-2 各クラスの標本数 (T-20)												
項	II	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	q ₅	q ₆	q ₇	q ₈	q ₉	Σq	
標本数	76,000	14,000	16,000	10,000	12,000	10,000	24,000	17,000	13,000	20,000	12,000	460,000

付表 5-5-2 各クラスの波長域別平均値 (T-20)												
項	II	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	q ₅	q ₆	q ₇	q ₈	q ₉	Σq	
φ	(H ₁)	1,223	2,357	0,562	0,300	2,000	4,705	18,158	7,050	5,100	8,235	
φ	(H ₃)	22,579	42,142	18,562	16,400	18,333	22,750	15,000	24,167	84,647	170,846	
φ	(H ₅)	0,671	1,214	1,750	0,0	1,533	0,0	0,0	-7,942	102,762	58,750	
φ	(H ₇)	0,750	2,214	3,620	0,200	3,133	0,167	0,0	0,125	37,705	23,692	
φ	(H ₉)	0,778	10,357	155,312	180,100	142,600	146,167	219,000	104,833	45,000	115,921	
φ	(H ₁₁)	2,000	19,000	11,000	11,000	11,067	25,750	15,700	33,297	69,000	85,536	

付表 5-6-2 各クラスの波長域別標準偏差 (T-20)												
項	II	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	q ₅	q ₆	q ₇	q ₈	q ₉	Σq	
φ	(H ₁)	2,237	3,076	1,547	0,674	3,658	2,182	2,637	6,111	10,822	5,703	
φ	(H ₃)	9,480	8,811	4,395	3,864	4,477	4,158	5,495	17,072	10,172	8,983	
φ	(H ₅)	1,602	2,833	1,576	0,0	1,552	0,0	0,0	6,126	6,416	9,722	
φ	(H ₇)	1,921	3,745	1,927	0,421	1,576	0,389	0,0	0,378	5,224	4,347	
φ	(H ₉)	2,063	9,628	3,928	8,418	7,423	8,861	18,547	17,714	11,500	5,159	
φ	(H ₁₁)	2,197	8,405	0,0	0,0	4,265	8,347	5,025	7,503	4,551	10,796	

付表 5-7 級内分散共分散行列

チャネル	CH ₁	CH ₃	CH ₅	CH ₇	CH ₉	CH ₁₁
T	126.9282					
1	30.5236	317.0601				
1	68.4930	136.6144	194.5434			
1	42.1720	123.2557	198.2526	244.2094		
9	44.9040	60.1637	202.2166	255.8259	633.3240	
CH ₁₁	-72.4764	84.5691	-18.5095	19.3194	-103.9049	364.6560
CH ₁	43.1188					
T	5.6149	146.2104				
1	18.6092	39.9970	64.6282			
1	8.1651	30.7384	50.8938	64.7833		
20	5.2052	27.5391	39.6795	49.4223	150.8395	
CH ₁₁	-2.0585	17.5882	4.6726	7.9111	-2.6050	217.1678

付表 5-8 級内相関係数

チャネル	CH ₁	CH ₃	CH ₅	CH ₇	CH ₉	CH ₁₁
T	1.0000					
1	0.1522	1.0000				
1	0.4041	0.5501	1.0000			
1	0.2395	0.4430	0.9096	1.0000		
9	0.1584	0.1343	0.5761	0.6492	1.0000	
CH ₁₁	-0.3869	0.2487	-0.0699	-0.0647	-0.2162	1.0000
CH ₁	1.0000					
T	0.0707	1.0000				
1	0.3525	0.4115	1.0000			
1	0.1545	0.3158	0.7865	1.0000		
20	0.0645	0.1854	0.4019	0.5000	1.0000	
CH ₁₁	-0.0213	0.0987	0.0394	0.0667	-0.0144	1.0000

付表 5-9 線形判別関数の係数

チャネル	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆
T	0.00084	-0.00077	0.01952	0.01222	0.00213	0.10154
1	0.00498	0.00351	0.00825	-0.04469	-0.00053	0.00891
1	0.00550	0.01266	-0.02822	0.04766	0.11068	-0.10165
1	0.01228	-0.02135	0.00442	-0.00373	-0.10289	0.06127
9	-0.00343	0.01763	0.00715	-0.00288	-0.00247	0.00086
CH ₁₁	0.00065	0.00004	0.02410	0.02071	0.00026	-0.00470
定数	-0.54428	-1.07896	-1.82326	0.89134	0.35919	-0.31610
T	-0.00222	0.00098	-0.00118	0.04932	-0.04641	0.07908
1	-0.00404	-0.00325	0.01732	0.01505	0.03590	0.01844
1	-0.00290	0.00274	-0.00598	0.02886	-0.01940	-0.15680
1	-0.01389	-0.00884	-0.02039	-0.05290	-0.00341	0.10717
9	0.00192	0.01664	0.01080	-0.00012	0.00160	0.00251
CH ₁₁	0.00011	-0.00258	0.01838	-0.00948	-0.02400	-0.00473
定数	0.66059	-0.54491	-2.05657	-0.04781	-0.31279	-0.86529

付表 5-10 Z座標空間での地表クラススの重心

目的変数 カテゴリ	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆
g ₁	-0.40322	-0.96077	-1.26982	0.06024	0.82942	-0.02326
g ₂	-1.21832	1.57921	-0.35280	-0.06616	-0.14658	-0.06890
g ₃	-1.17663	1.47037	0.07687	0.11505	0.00222	0.08252
g ₄	0.87719	-0.04926	-0.15982	-0.26009	-1.54405	0.00008
g ₅	0.50369	0.06900	0.77542	-2.01079	0.76648	-0.05978
g ₆	2.44071	1.20605	-0.51079	0.90484	0.98886	0.01487
g ₇	-0.16692	-0.81651	0.42914	-0.12573	0.22876	0.16852
g ₈	-0.07201	-0.53243	2.15020	0.93260	0.06989	-0.03268
g ₉	-0.36685	-0.56797	0.67258	0.78487	0.04855	-0.09710
g ₁₁	-0.63940	-1.45725	0.21566	0.13665	0.13665	-0.42952
g ₁₂	-0.57118	-0.52064	0.42569	0.62012	0.06225	0.06225
g ₂₁	1.52424	0.05946	-0.00424	0.26506	-0.02462	-0.02462
g ₂₂	1.85977	0.54630	0.06117	0.23693	-0.19117	-0.19117
g ₂₃	1.71521	-0.05454	0.02712	0.25752	-0.06066	-0.06066
g ₃₁	1.74558	0.26151	0.20970	-0.05525	0.11555	0.11555
g ₃₂	2.01220	0.05460	0.10218	0.10564	0.04665	0.04665
g ₃₃	1.03770	0.10031	0.10031	-0.10102	-0.10102	-0.10102
g ₄₁	-0.45444	0.22227	0.38510	0.25277	0.51581	0.51581
g ₄₂	-0.18254	0.16958	-0.98219	0.69438	0.75008	0.75008
g ₄₃	0.03554	-0.47257	-1.35332	0.30719	0.94132	0.94132
g ₄₄	0.33319	-0.44805	-1.74539	0.70350	1.16343	1.16343
g ₅₁	-0.45563	0.05677	0.14025	0.57650	0.67355	0.67355
g ₅₂	-0.68607	1.50884	1.65012	1.51444	-0.29272	-0.29272
g ₆₁	1.03758	-0.10356	-1.12261	-0.49112	-0.76157	-0.76157
g ₆₂	1.04231	-1.26667	3.35427	-2.07459	1.43692	1.43692
g ₆₃	-0.16439	0.6713	0.67404	0.31628	-1.47350	-1.47350
g ₇	-0.84257	0.23855	0.16082	-0.11705	0.15421	0.15421
g ₈	-0.71315	1.67081	-0.43200	-1.45386	0.09750	0.09750
g ₉	-0.56541	0.33025	-0.52423	-0.69792	-0.13429	-0.13429

附表 5-11

[illegible]